

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関する研究

令和 2年11月27日

田島 礼子

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ



1. 背景・目的

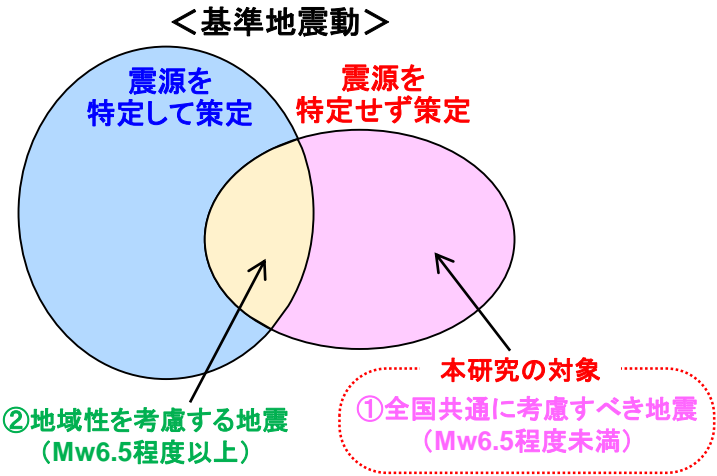
基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイドでは、「震源を特定せず策定する地震動」のうち「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」(Mw6.5程度未満)については、震源の位置も規模もわからない地震として地震学的検討から全国共通に考慮すべき地震と位置づけているが、事業者による個別波検討に関する中長期課題の解決に時間を要していた。

このような状況を鑑みて、原子力規制委員会は、外部専門家を交えた「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」を設けた(平成29年11月)。検討チームでは、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」を策定し、報告書(原子力規制委員会, 2019)にまとめた(令和元年8月)。

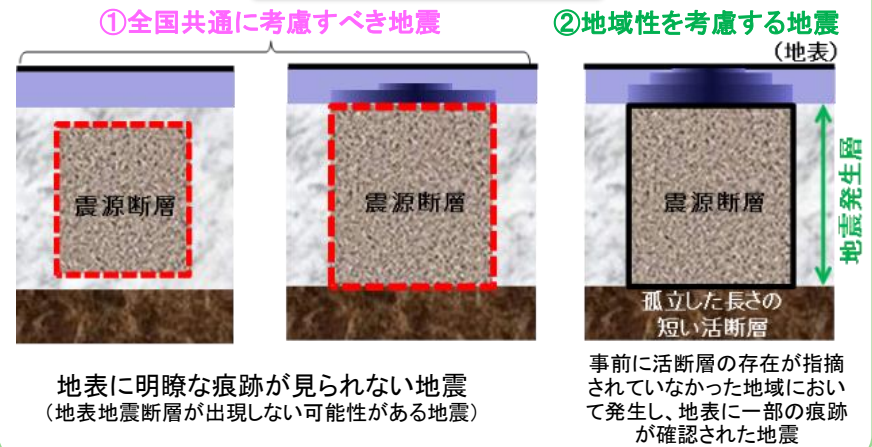
本研究は、検討チームにおける「標準応答スペクトル」の策定に資する知見を得ることを目的に実施したものである。

震源を特定せず策定する地震動とは

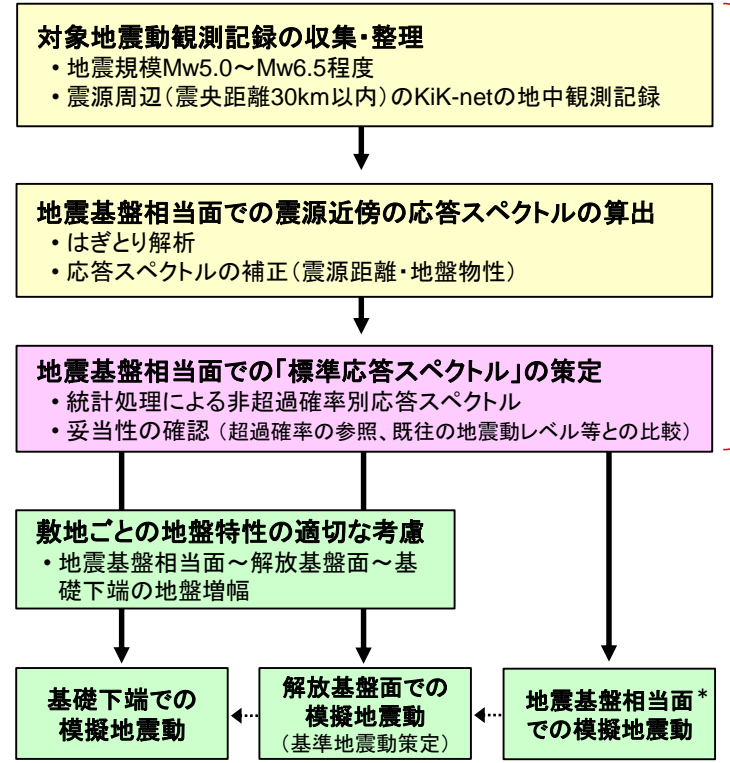
敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず、全ての敷地(対象サイト)において共通的に考慮すべき地震動であると意味づけた地震動。



震源像のイメージ



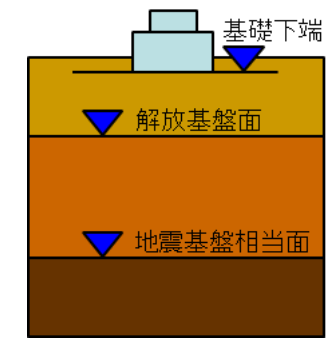
全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」検討の流れ



検討チームの検討対象

事業者の検討対象

*敷地ごとの地盤特性を適切に考慮する過程で必要に応じて実施。



※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。

2. 地震動観測記録の収集・整理

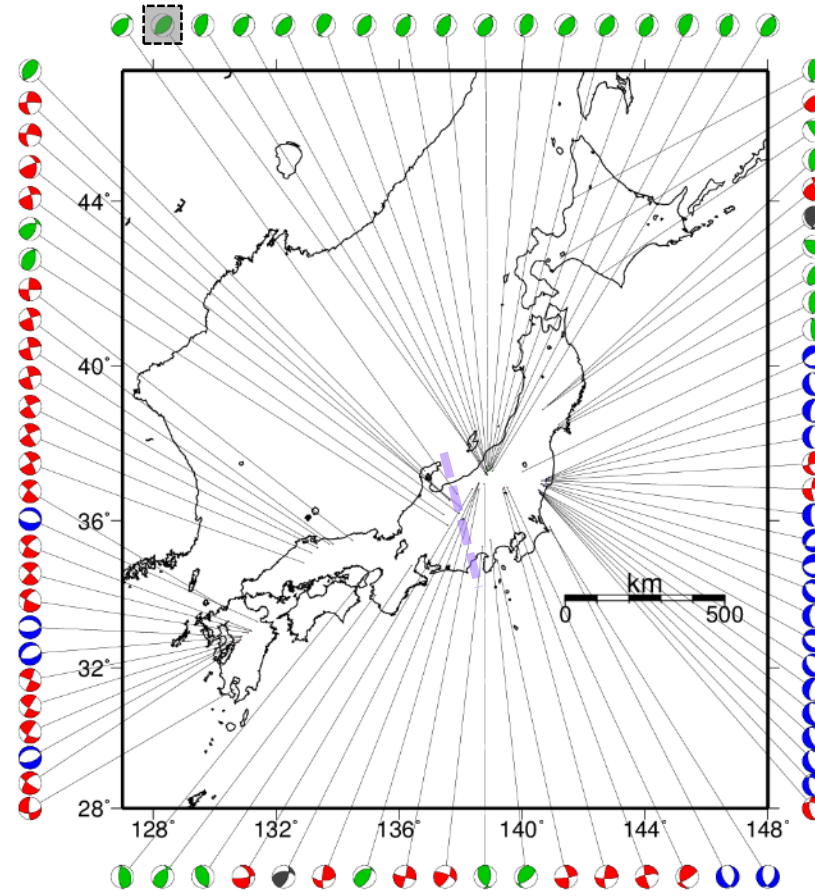
全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の対象となる「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」(Mw6.5程度未満)は、断層破壊領域が地震発生層の内部に留まり、国内においてどこでも発生すると考えられる震源の位置も規模も推定できない内陸地殻内の地震であり、震源近傍において強震動が観測された地震である。

そのことを踏まえ、国立研究開発法人防災科学技術研究所のKiK-net観測点が整備された2000年以降に起きたMw5.0~6.6の内陸地殻内地震を対象に、硬質地盤($V_s=700\text{m/s}$ 程度以上)に設置された地中地震計における震央距離30km以内の観測記録を網羅的に収集した。

収集した地震・記録を整理し、89地震の地中観測記録(水平動614記録、上下動304記録)をその後の解析に採用した。

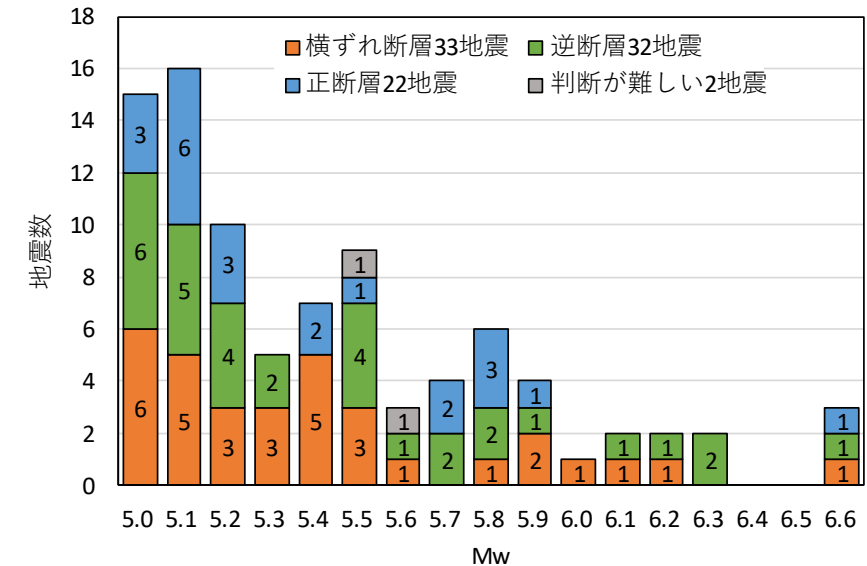
地震動観測記録の収集条件

- 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(気象庁一元化震源)
- 観測記録：震央距離30km以内にあるKiK-netの記録



収集条件を満たす地震の震央分布(90地震)

☐: PS検層による地盤情報がないため検討対象から除外



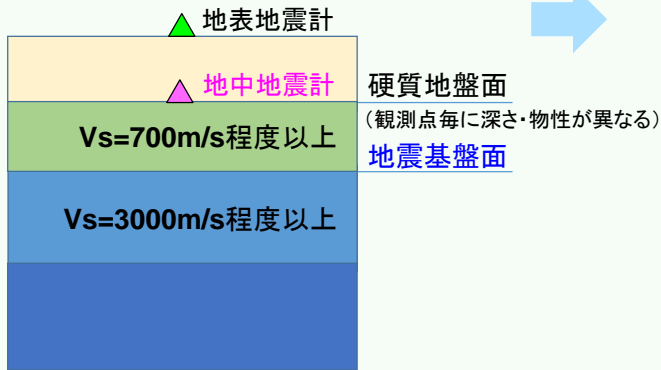
断層タイプごとの地震数

断層タイプ	横ずれ断層	逆断層	正断層	判断が難しい	合計
地震数	33	32	22	2	89

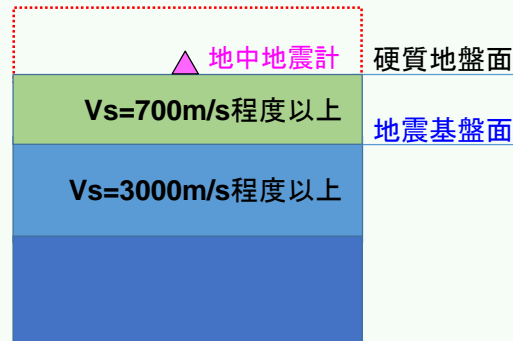
3. はぎとり解析及び応答スペクトルの補正

収集した観測記録について、地中地震計よりも上の地盤の影響を除去するためのはぎとり解析を実施し、硬質地盤の解放面における地震動を算出した。さらに、それらを震源近傍(半径10km程度以内の領域)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、地震動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。

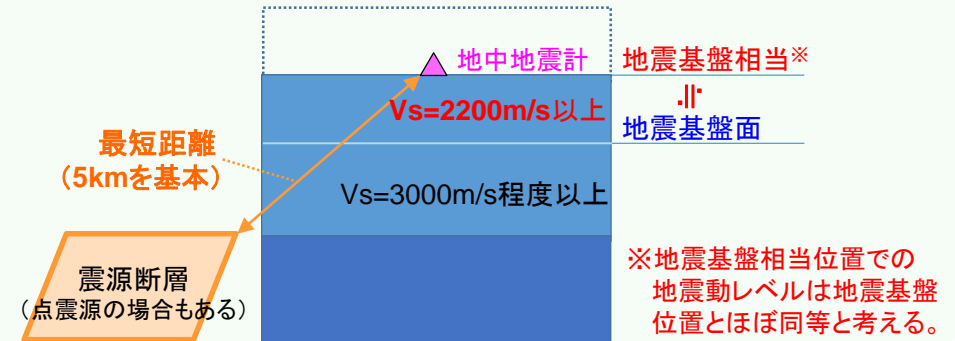
①地震動観測記録



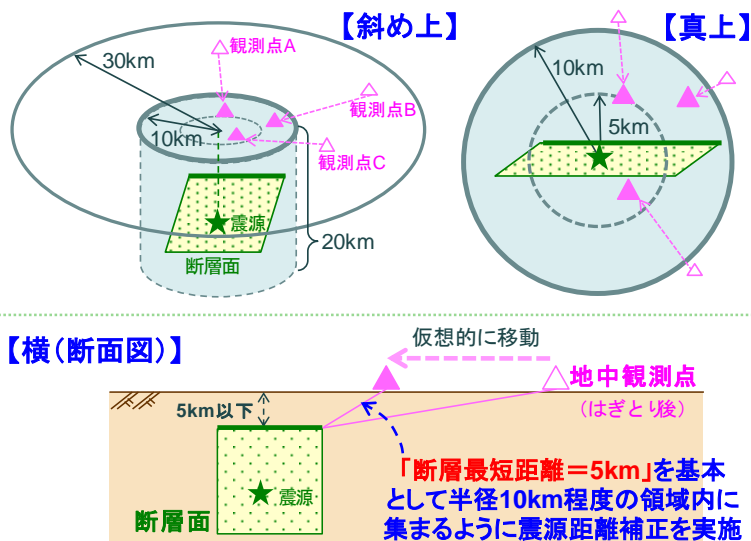
②はぎとり解析後



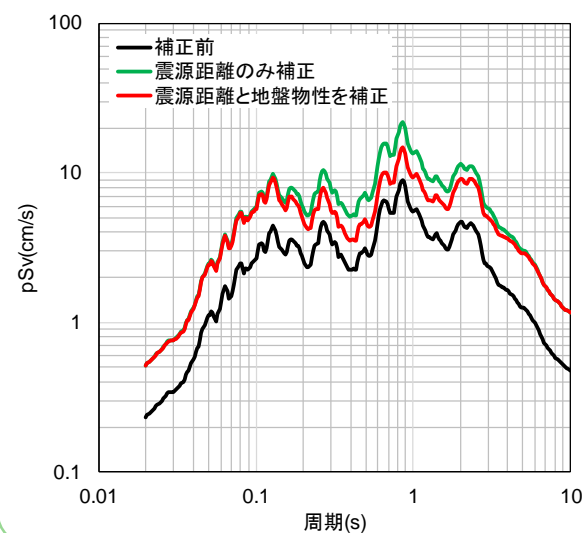
③応答スペクトルの補正(震源距離・地盤物性)



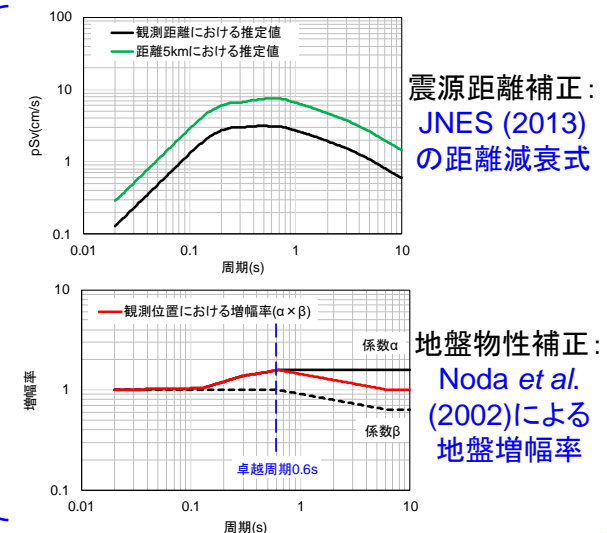
震源距離補正のイメージ(断層面設定の場合)



応答スペクトル補正の例



補正に用いる経験式による推定値



4. 統計処理のデータセットの確認

統計処理に用いる補正後の応答スペクトルについて、地震活動タイプ(前震、本震、余震)、地中地震計位置の地盤のVs、統計処理に用いる地震の数等の地震特性、観測条件による差異の有無を確認するために、それらに係る情報を整理(ラベル付け)してグループ分けを行った。その結果、データセット(データ数)に極端又は非現実的な偏り等が生じていないことを確認し、全国共通に考慮する地震動であることから、統計処理においてはグループ毎ではなくすべての地震動記録を1つのデータセットとして扱うこととした*。

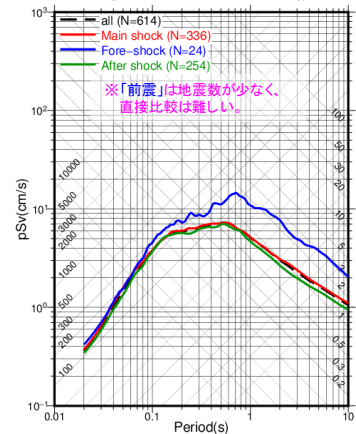
*グループごとの地震動レベルに差異が生じる場合であっても、非現実的な特性でなければ、統計処理においては1つのデータセットとして扱うこととした。

ラベル付けに基づくグループ毎の擬似速度応答スペクトル(h=5%)の比較例(水平動)

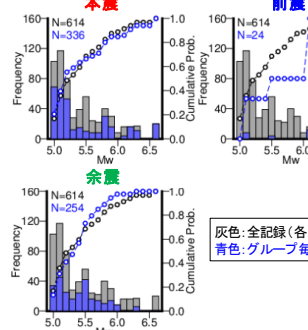
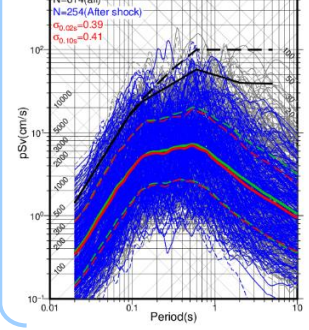
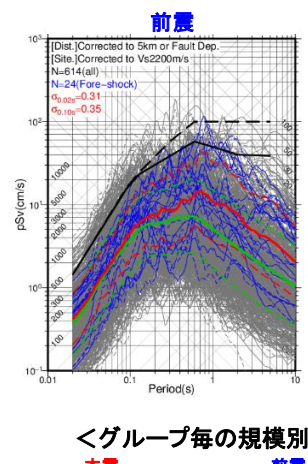
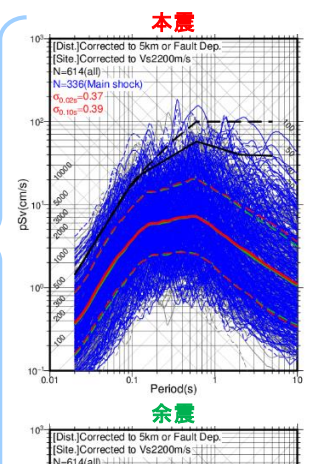
地震活動タイプ(前震、本震、余震)

統計処理に用いる地震(記録)の数

平均スペクトルの比較



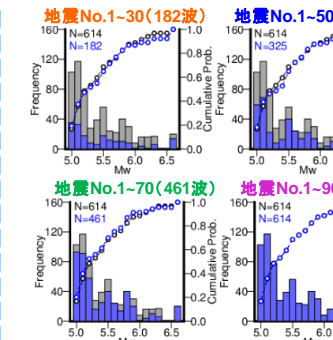
※「前震」は地震数が少なく、直接比較は難しい。



<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>

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

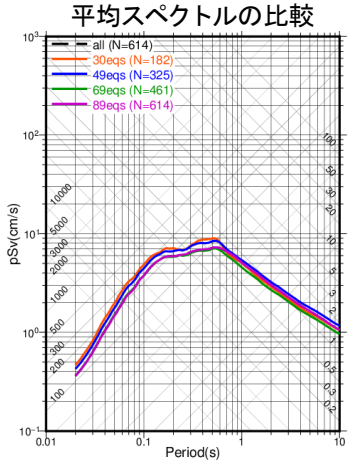
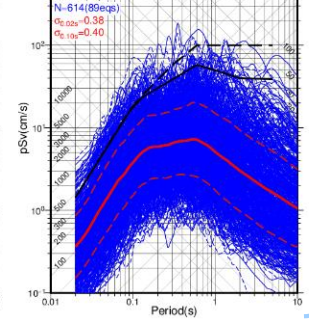
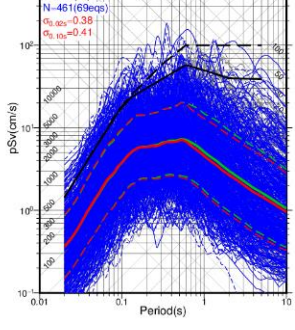
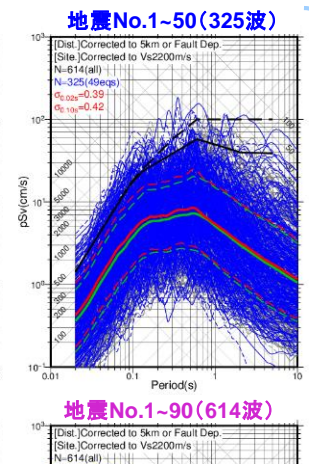
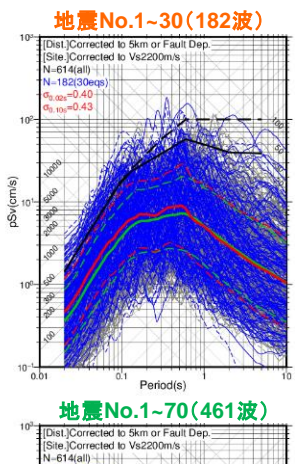
各図で異なる凡例
青色: はぎとり波(グループ毎)
実線: NS, 破線: EW
赤色: 統計処理(グループ毎)
実線: はぎとり波(青色)の平均
破線: はぎとり波(青色)の平均±σ



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>
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。

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。



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

<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)。

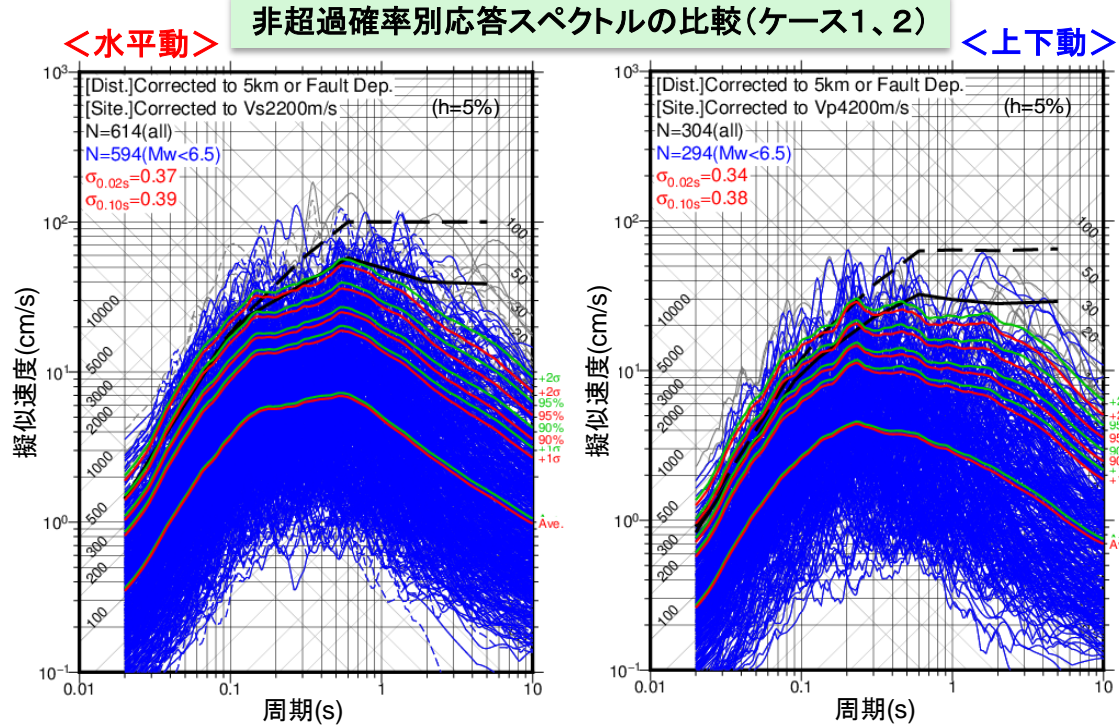
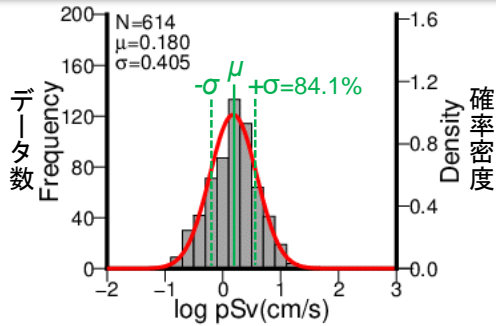
5. 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出

下記条件毎に、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。

＜算出ケース＞

- ケース1: 全データ
- ケース2: 対象地震(Mw6.5未満)
- ケース3: 地震・記録数(G-R則想定)
- 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)
- ケース5: 地中地震計位置の地盤のVs (Vs=2000m/s以上)
- はぎとり精度に係る確認用ケース

周期Ti秒での地震動強さのヒストグラムと確率密度関数

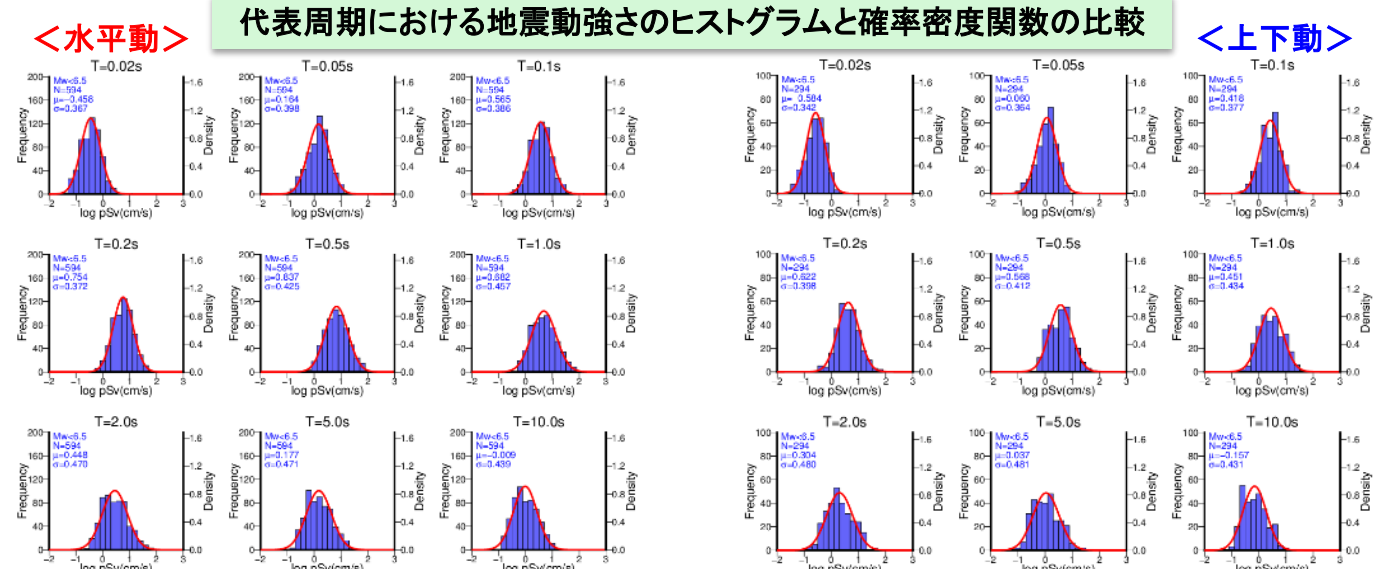


＜ケース2 (Mw6.5未満)＞
 非超過確率別スペクトル
 はぎとり波(水平動では実線: NS成分、破線: EW成分)

＜ケース1 (全データ)＞
 非超過確率別スペクトル
 はぎとり波(水平動では実線: NS成分、破線: EW成分)
 加藤スペクトル
 水平動 実線: Vs=2200m/s、破線: Vs=700m/s
 上下動 実線: Vp=4200m/s、破線: Vp=2000m/s

＜記号の説明＞
 N: データ数
 $\sigma_{0.02s}$: 周期0.02秒での標準偏差(常用対数)
 $\sigma_{0.1s}$: 周期0.1秒での標準偏差(常用対数)

Ave.= 非超過確率50.0%
 +1 σ = 非超過確率84.1%
 +2 σ = 非超過確率97.7%



データ数
対数正規分布を仮定した確率密度関数

6. 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認 (1/2)

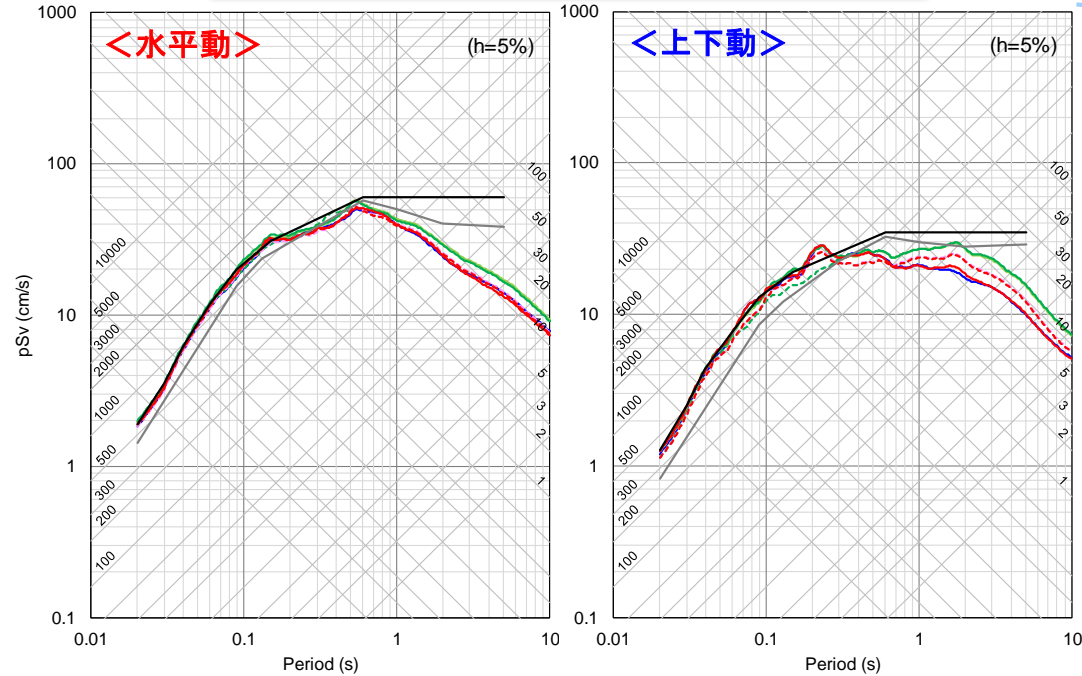
標準応答スペクトルは、地震規模Mw5.0～6.5程度の地震動記録を対象として、複数条件(データの充足度が高く不確実さを低減させたケース*)の統計処理により算出した非超過確率97.7%の応答スペクトル及び、以下の①の前提条件及び②の妥当性確認を基に設定した。

* 右図凡例参照

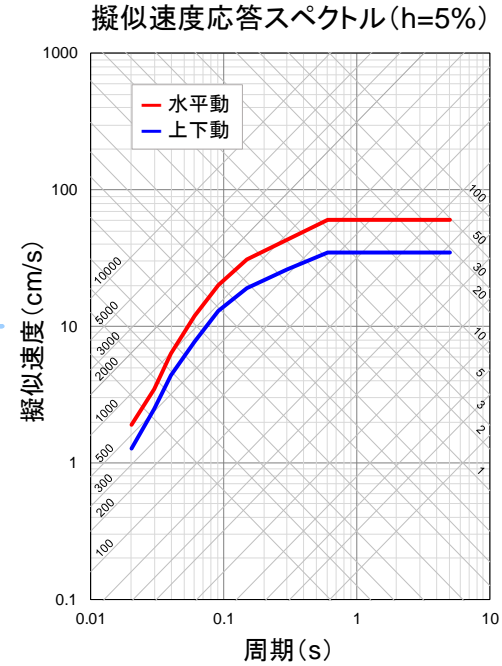
① 一部周期帯で加藤スペクトルを超える地震動が観測されていることから、短周期側で加藤スペクトル相当の地震動レベルとなる非超過確率95%のスペクトルを上回るレベルとすることを前提とする。

② 標準応答スペクトルのレベルが、地震動の年超過確率の 10^{-4} と 10^{-5} の間程度に対応していること、かつ、他の手法(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を確認することにより、妥当性を判断する。

非超過確率97.7%の応答スペクトルの比較



標準応答スペクトル



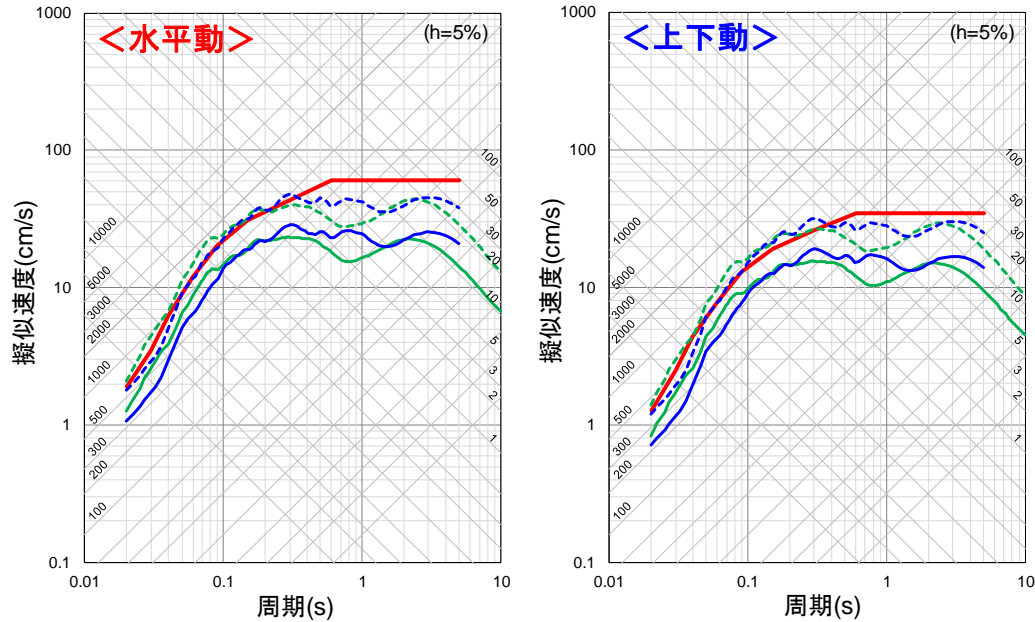
- 標準応答スペクトル
- 加藤スペクトル
水平動: Vs=2200m/s、上下動: Vp=4200m/s
- <非超過確率97.7%の応答スペクトル>
【標準応答スペクトルの設定に使用】
- ケース2: 対象地震(Mw6.5未満)
- ケース3: 規模別の地震・記録数(G-R則想定)
- ケース4a: はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その1
※ 重み: Group A=1, B=1, C=0.5, D=0の場合
- ケース4b: はざとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その2
※ 重み: Group A=1, B=1, C=0, D=0の場合
- 【はざとり精度の確認に使用】
- - - 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: 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: Group A=1, B=1, C=0, D=0の場合
- - - 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
※ 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

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

6. 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認 (2/2)

地震動の年超過確率の参照 (確率論的地震ハザード解析の結果との比較)



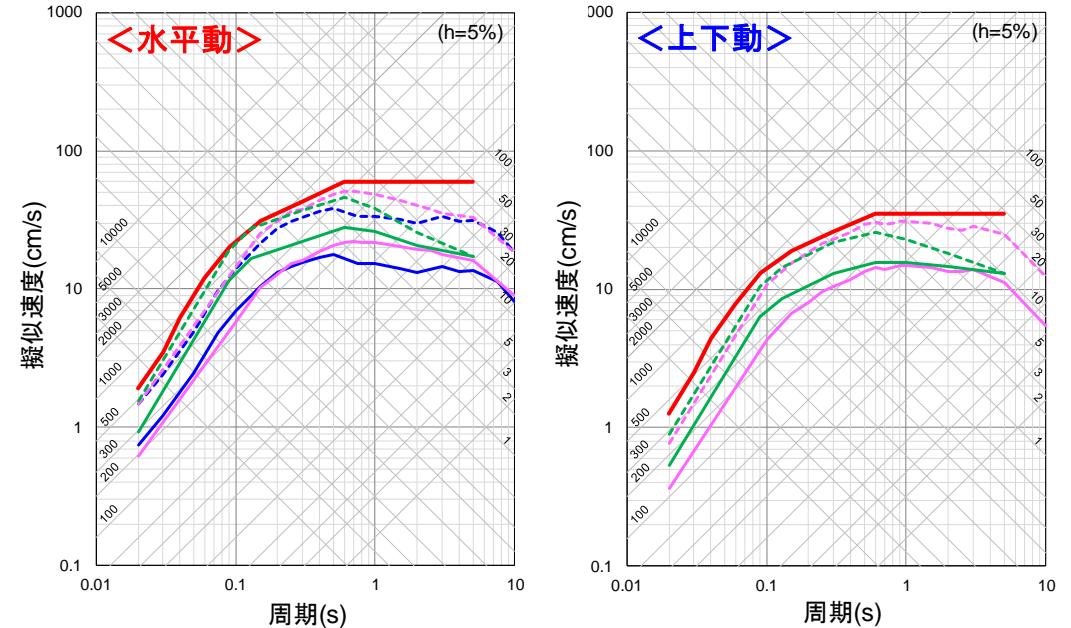
— 標準応答スペクトル
— 原子力安全基盤機構(2005)による年超過確率別スペクトル
— 原子力安全基盤機構(2012)による年超過確率別スペクトル
 実線: 地震動の年超過確率 10^{-4}
 破線: 地震動の年超過確率 10^{-5}
 ※ $V_s=2600\text{m/s}$ の地震基盤相当面におけるスペクトルレベルである。
 ※上下動は水平動の2/3のレベルとした。

標準応答スペクトルのレベルは、既往研究により算出された一様ハザードスペクトルの年超過確率の 10^{-4} と 10^{-5} の間程度に対応している。

「地震動の年超過確率の考え方」に基づいた概算結果※

半径 (km)	面積 (km ²)	地震の年発生頻度 (個/年): A	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%

距離減衰式による推定値との比較 (上限となるMw6.5相当を想定)



— 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
 ※M6.9 (Mw6.5相当)、等価震源距離10km、 $V_s=2200\text{m/s}$ ($V_p=4200\text{m/s}$)
— 原子力安全基盤機構(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、 $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 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+1σ
 ※Mw6.5、断層最短距離5km、 $AVS30=2500\text{m/s}$

- 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る。
- 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価で用いられているNoda et al. (2002)の内陸補正なしの場合の結果と同等のレベルである。

注) 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)。

※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た場合には、地震動の年超過確率は $P=1-\exp(-A \times B)$ により求まる (Aが十分に小さい場合には $P \approx A \times B$ と近似可能) という考え方に基いて概算した結果。→ 非超過確率97.7%は年超過確率 5×10^{-5} 程度に対応。

7. まとめ

- 本研究では、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の収集・分析を行い、これらの地震動記録について統計的な手法を用いた処理を行うことにより、震源近傍での地震基盤相当面における標準応答スペクトルを策定した。
- 標準応答スペクトルの検討に係る以下の項目については、「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」において、新たな観測記録や知見の蓄積及び技術の高度化に関連して将来の課題があることが議論されたため、今後の安全研究において検討していく予定である。
 - ・収集可能な地震及び記録数
 - ・はぎとり解析の精度
 - ・応答スペクトルの補正(震源距離、地盤物性)
 - ・妥当性の確認に用いる距離減衰式

引用文献

- 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(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.
- 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(2019): 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, *震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム報告書*, 36pp. <https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youushikisya/tokuteisezu_jishindo/houkoku.html>.
- 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.
- 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.