

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

震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム

令和元年8月7日



# 目 次

1. 背景・目的	1
2. 標準応答スペクトルに係る検討	3
2.1 地震動観測記録の収集・整理	3
2.2 はぎとり解析	5
2.3 応答スペクトルの補正	6
2.4 ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認	10
2.5 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出	13
2.6 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認	16
2.7 時刻歴波形の作成方法	26
2.8 標準応答スペクトルに係る将来の課題	28
3. 事業者意見の聴取	30
4. まとめ	31
引用文献	33

## 1. 背景・目的

新規制基準では、原子力発電所等における基準地震動として、「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」について、解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定することを要求している。

新規制基準適合性審査においては、「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」[モーメントマグニチュード (Mw) 6.5 程度未満<sup>1)</sup>の地震]については、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」(以下「審査ガイド」という。)に例示されている Mw6.5 未満の 14 地震の中から敷地に及ぼす影響が大きいとして抽出された 5 地震のうち、2004 年北海道留萌支庁南部地震について佐藤ほか(2013)で推定された基盤地震動に不確かさを考慮した地震動を「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。

このような状況を鑑みて、原子力規制委員会は、「震源を特定せず策定する地震動」(Mw6.5 程度未満の地震)の検討対象地震については、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られていることから、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、所要の検討を進めることとした。

本検討チームは、石渡原子力規制委員会委員、外部専門家、原子力規制庁職員による構成とし、公開の場で議論するとともに、資料も原則公開することとした。

平成 30 年 1 月から検討チーム会合を開始し、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<sup>2)</sup>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(以下「地震基盤相当面」という。)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(以下「標準応答スペクトル」という。)を策定するための検討及び議論を行った。加えて、標準応答スペクトルに基づいて事業者

---

1) 現行審査ガイドでは「Mw6.5 未満」としているが、Mw の推定誤差等を考慮して、以降では「Mw6.5 程度未満」とする。

2) 審査ガイドでは地震基盤は  $V_s = 3000\text{m/s}$  程度以上の地層と定義している。

が作成することとなる時刻歴波形（模擬地震波）の作成方法とその留意点についても議論した。また、事業者から、中長期課題として整理していた残り 4 地震の検討状況、並びに検討チームにおける取り組みに係る検討方針、検討内容及び策定した標準応答スペクトルに関して技術的観点からの意見を聴取した。

## 2. 標準応答スペクトルに係る検討

### 2.1 地震動観測記録の収集・整理

審査ガイドでは、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の検討対象とする内陸地殻内の地震は、地震規模のスケーリング（スケーリング則が不連続となる地震規模）の観点から、「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」を適切に選定することとしている。「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」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地震で、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（ $M_w6.5$  程度未満の地震）であり、震源近傍において強震動が観測された地震を対象とすると解説している〔詳細は参考資料の 2 章（p.4~6）を参照〕。

なお、「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」の規模を  $M_w6.5$  未満とすることについては、地震調査研究推進本部による強震動予測レシピ〔地震調査研究推進本部(2017)〕などでも採用されているように、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  $M_0 = 7.5 \times 10^{18} \text{ Nm}$  ( $M_w6.5$ )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)等〕。

次ページに示す検討チーム会合における議論を踏まえ、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  $M_w5.0 \sim 6.6$  の内陸地殻内地震<sup>3)</sup>を対象に、硬質地盤〔S 波速度 ( $V_s$ ) = 700m/s 程度以上〕に設置された地中地震計における震央距離<sup>4)</sup>30km 以内の観測記録を、表 2.1 の条件に基づき網羅的に収集した。さらに、収集した地震動観測記録について、観測点設置方位の適正化、地表・地中観測記録の比較確認による整理を行ったうえで、観測波形の主要動部分の切り出し（トリミング）を行い、以降の解析に用いる記録を整理し、89 地震の観測記録〔水平動 614 波（NS 成分 309 波、EW 成分 305 波）、上下動（UD 成分）304 波〕を採用した〔詳細は参考資料の 3 章(p.7~10)、p.12 を参照〕。

- 
- 3) 審査ガイドに例示の 2000 年よりも前に起きた地震については、KiK-net による地震動観測記録が得られていないため検討対象外とした。
  - 4) 「震央距離」とは地震が起きた点（震源）の真上の地表における点（震央）から観測点までの表面的な距離のことである。ちなみに、「震源距離」とは震源（点）から観測点までの 3 次元的な最短距離のことであり、「断層最短距離」とは地震の震源断層（面）と観測点との 3 次元的な最短距離のことである。

表 2.1 地震動観測記録の収集条件

期間	2000年～2017年の18年間
地震規模	Mw5.0～6.6
震源深さ	20km以浅
観測記録	震央距離30km以内のKiK-net観測点における地表・地中地震計の地震動観測記録（NS, EW, UD成分）

【検討チーム会合における議論】

- ・ 審査ガイドでは対象地震は「Mw6.5未満」と記載されているが、Mwの推定誤差等を考慮して「Mw6.5程度未満」と考え、地震動観測記録の収集にあたってはMw6.6の規模まで含める。
- ・ 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ため、対象とする地震の規模の下限をMw5.0とする。
- ・ 審査ガイド策定以降に発生した地震（審査ガイドに例示の14地震以外の地震）についても、条件を満たすものは統計処理の対象とする。
- ・ 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び地域性を考慮する「震源を特定せず策定する地震動」<sup>5)</sup>にあたる地震も一旦はデータセットに含めて処理・分析し、最終的な標準応答スペクトルの設定の際に取扱いを検討する。
- ・ 将来的には適切なデータが得られた場合には海外の観測記録についても検討対象とすることも考えられる。

5) 審査ガイドでは、地域性を考慮する「震源を特定せず策定する地震動」とは、「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、地表付近に一部の痕跡が確認された地震」であり、震源断層がほぼ地震発生層の厚さ全体に広がっているものの、地表地震断層としてその全容を表すまでには至っていない地震（震源の規模が推定できない地震（Mw6.5以上の地震））としている。

## 2.2 はぎとり解析

2.1 節で収集・整理した 89 地震の地中観測記録について、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（以下「はぎとり波」という。）を算出した〔詳細は参考資料の 4 章(p.11~15)を参照〕。

はぎとり解析では、以下のような確認を行ったうえで、KiK-net 観測点の公開の PS 検層結果に基づく次元地盤モデルを用いた重複反射理論による線形解析を採用した。

- ・審査ガイドに例示の 9 地震を対象とした予備検討において、地盤に非線形性が生じている 6 地震 11 記録に対して、採用した手法（線形解析）及び非線形特性を確認するための 2 手法（等価線形解析、地盤同定による最適化モデルを用いた線形解析）の計 3 手法によるはぎとり解析の結果を比較したところ、地中観測点位置におけるはぎとり解析結果は概ね同等となり、解析手法がはぎとり波に与える影響は小さいことが分かった〔詳細は参考資料の付録 A (p.135~146)を参照〕。
- ・事業者より提出された主要原子力施設設置者(2018b)による資料では、中長期課題とされている 3 記録について、「KiK-net の公開の PS 検層結果」及び事業者が独自に行った「詳細な地盤調査結果」に基づく最適化モデルを用いた場合のはぎとり解析結果の比較が示され、詳細な地盤調査により地盤の層厚や物性値が変わった場合でも、地中観測点位置におけるはぎとり解析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を確認した〔詳細は参考資料の p.66 を参照〕。

地盤モデルに設定する減衰定数 ( $h$ ) については、水平動では 5 種類（1%、3%、5%、7%、9%）、上下動では 3 種類（1%、3%、5%）の複数の値を試行し、地中観測波を地表に立ち上げた計算結果が地表観測記録と最も整合する（対数残差が小さくなる）減衰定数を選定した。

はぎとり解析の精度（以下「はぎとり精度」という。）については、地中記録を地表に立ち上げた場合の観測記録の再現性を確認することにより判断し、各周期の「地表立ち上げ波（計算）／地表観測記録」の応答スペクトル比が 1/3~3 倍の範囲外の場合に「はぎとり精度が低い」とした。



## 2.3 応答スペクトルの補正

2.2節で算出した硬質地盤面でののはぎとり波を震源近傍での地震基盤相当面における地震動として扱うために、はぎとり波の応答スペクトル ( $h=5\%$ ) に対し、必要に応じて「震源距離補正」及び「地盤物性補正」を施した〔詳細は参考資料の5章(p.16~30)を参照〕。

### (1) 震源距離補正

検討チーム会合における次ページの議論を踏まえて、震央距離 30km 以内で収集した観測記録を半径 10km 程度<sup>6)</sup>の震源近傍の領域内で観測されたものと想定して統計処理上のデータ数を確保するために、はぎとり波の応答スペクトルに震源距離補正<sup>7)</sup>を施した。補正には、水平・上下動の地震基盤相当面における評価が可能な原子力安全基盤機構<sup>8)</sup>(2013)による距離減衰式<sup>9)</sup>を用いて、補正前後の最短距離<sup>10)</sup>での応答スペクトル比を補正倍率とする方法を採用し、震源と観測点の最短距離を 5km (10km の中間距離) に補正することを基本とした。ただし、断層上端の深さが 5km よりも深い場合には、深さ方向の距離を変えずに距離が最も近くなるように、断層の直上に観測点が集まる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〔詳細は参考資料の 5.1 節(p.18~24)、p.74 を参照〕。なお、最短距離が元々 5km 未満の場合には補正を行わないこととした。

- 
- 6) 地震の震源断層は有限の広がりを持ち、断層面の大きさには規模依存性(スケールリング則)がある。本検討で対象とする地震は最大で Mw6.5 程度であり、その断層長さは 20km 程度となり、断層が位置するような領域は「震源近傍」となり得ることから、Mw6.5 程度の地震の断層が収まる半径 10km 程度の範囲を震源近傍の領域とした。
  - 7) 本検討における「震源距離補正」という用語の中の「震源距離」については、地震の震源断層等に係る情報から震源断層(面震源)を設定する場合には、面震源と観測点の最短距離である「断層最短距離」を採用し、面震源を設定しない場合には点震源と観測点の最短距離である「震源距離」を採用した〔詳細は参考資料の p.19~24 を参照〕。なお、点震源の設定は Mw5.5 未満の地震を対象としたため、震源の面としての広がり小さく点震源を仮定することによる影響は小さくなり、また、面震源の場合よりも補正距離が長くなるのでやや保守的な補正となる。
  - 8) 原子力安全基盤機構は、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。
  - 9) 「距離減衰式」とは、地震の揺れの強さについて地震規模や震源からの距離との関係式として表したものであり、「地震動予測式(GMPE: Ground Motion Prediction Equation)」とも呼ばれる。
  - 10) 7)と同様に、本検討における「最短距離」については、震源を面震源として設定する場合には「断層最短距離」を採用し、点震源として設定する場合には「震源距離」を採用することとした。

#### 【検討チーム会合における議論】

- ・本来は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ことが望ましいと考えられるが、震央距離 10km 以内で実際に観測された記録は少なく（1成分 40 波程度）、対象の地震も減り Gutenberg-Richter 則（以下「G-R 則」という。）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適切でない。
- ・現状では震源近傍の領域（半径 10km 程度以内）での統計処理上のデータ数を確保するために、震源近傍よりもやや遠い範囲を含む震央距離 30km 以内で収集した観測記録に対して、震源距離補正を実施する必要がある。
- ・補正に用いる距離減衰式は、複数の式の適用範囲や補正倍率の比較検討を行ったうえで選定する必要がある [詳細は参考資料の付録 B (p.147~154) を参照]。
- ・2.4 節の「⑦補正前の震源と観測点の最短距離」のラベル付けにおいて、震源距離補正の結果が統計処理のデータセットに与える影響を確認する。また、統計処理においては、震源距離補正を実施した場合としない場合の比較を行う [詳細は参考資料の p.52~54 を参照]。
- ・震源距離補正で記録をどの程度の領域（距離）に集めるかについては、標準応答スペクトルの基となる地震動の非超過確率の設定及びその妥当性確認と合わせて検討することにより、震源距離を何 km に補正するかが本質的に影響しないような考え方を採用する [詳細は参考資料の p.112~114]。

## (2) 地盤物性補正

検討チーム会合における以下の議論を踏まえて、硬質地盤面でののはざとり波を地震基盤相当面 ( $V_s=2200\text{m/s}$  以上<sup>11)</sup>) での地震動記録として扱うために、はざとり波の応答スペクトルに対して、地盤増幅率の経験式を用いた地盤物性補正を実施した。補正には Noda *et al.* (2002)による地盤増幅倍率の経験式を採用し、同文献では  $V_s=2200\text{m/s}$  ( $V_p=4200\text{m/s}$ ) を地震基盤相当と定義<sup>12)</sup>していることに倣い、表 2.2 の条件で補正を実施した [詳細は参考資料の 5.2 節(p.25)を参照]。

表 2.2 地盤物性補正の条件

地中地震計位置 の地盤の速度	方針
水平動：2200m/s <u>未満</u> 上下動：4200m/s <u>未満</u>	地盤増幅倍率の経験式を用いて応答スペクトルを地震基盤相当面 ( $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4200\text{m/s}$ ) における地震動レベルに補正する。
水平動：2200m/s <u>以上</u> 上下動：4200m/s <u>以上</u>	地盤物性補正を行わない。

### 【検討チーム会合における議論】

- ・複雑な地盤の影響を大きく受けないと考えられる地震基盤相当面において標準応答スペクトルを策定することが望ましい。
- ・KiK-net の地中地震計位置の地盤の  $V_s$  は観測点ごとに異なる ( $V_s=700\sim 3000\text{m/s}$  程度の幅がある) ことから、統計処理で扱うデータの平均レベルを調整するという意味で地盤増幅率の経験式を用いた地盤物性補正を行う必要がある。
- ・補正に用いた Noda *et al.* (2002)による地盤増幅率の経験式には最近のデータが含まれていないため、2.4 節の「⑧地中地震計位置の地盤の  $V_s$ 」のラベル付けにおいて、平均スペクトルレベルでは地盤物性補正が問題なく実施されていること及び、 $V_s$  が遅い場合にはデータのばらつきが大きくなることを確認した [詳細は参考資料の p.55, 56 を参照]。

11) 本検討では、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  $V_s=2200\text{m/s}$  以上とした。

12) 地盤物性補正に用いた Noda *et al.* (2002)の地盤増幅率の経験式においては、 $V_s=2200\text{m/s}$  の地盤を「地震基盤相当」と定義し、 $V_s=3000\text{m/s}$  程度の地震基盤からの地盤増幅率は十分小さく、地震動としては同等とみなすことができると仮定している。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 ( $V_s=2200\text{m/s}$ ) といわき観測点・富岡観測点 ( $V_s=2800\text{m/s}$ ) の観測記録を用いた解析が行われ、両者の地盤増幅による地震動の差異が十分に小さいことが確認されている。

### (3) 地震規模の補正

地震規模の補正については、検討チーム会合における以下の議論を踏まえて、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」は事前に位置も規模も分からない地震を対象としており、また、地震規模を補正することにより観測記録が本来持っている震源特性を変化させることになるため、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〔詳細は参考資料の p.17 を参照〕。

#### 【検討チーム会合における議論】

- ・全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」は事前に位置も規模も分からないような地震を想定しているため、1つの規模の地震を想定することは望ましくない。
- ・対象地震の地震規模(Mw)の差異は最大 1.6 (= Mw6.6 - 5.0) と大きく、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である。また、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。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 倍変化させることになる。
- ・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。
- ・Mw5.0～6.5 程度の対象地震からなる地震動記録のデータセットでは、G-R 則に従って Mw が小さな地震の記録が占める割合が高くなるので、標準応答スペクトルの妥当性確認において、Mw の設定範囲が本質的に影響しない「地震動の年超過確率の考え方」も採用する〔詳細は参考資料の p.112～114、付録 C (p.155～158)を参照〕。

## 2.4 ラベル付けに基づく統計処理のデータセットの確認

統計処理に用いる補正後の各地震動記録（応答スペクトル）に対して、表 2.3 に示す地震及び観測記録に係る 11 項目の特性に関する情報をラベルとして付加し、それぞれの地震動記録を区別・整理できるようにするための処理（以下「ラベル付け」という。）を行った。さらに、ラベル付けに基づいて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た [詳細は参考資料の 6 章(p.31~63)を参照]。また、全国共通に考慮すべき地震動であることから、グループ毎の地震動レベルに差異が生じる場合でも、極端又は非現実的な特性でなければ、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。

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 [詳細は参考資料の p.67 を参照]。

- ・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地震動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。

表 2.3 ラベル付けの項目及び確認結果

項目	確認結果
① 地震規模 (Mw) ※参考資料 p.32~35	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Mw 範囲で分けた 4 グループの平均スペクトルについては、地震規模補正は実施していないため、規模が大きいほど地震動レベルが大きくなる傾向（長周期になるほど顕著）があるものの、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ことを確認した。</li> <li>・ データ数については、G-R 則に従い地震規模が小さいほど多くなる傾向があり、現実的な偏りが生じていることを確認し、1 つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
② 震源深さ ※参考資料 p.36, 37	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 震源深さの範囲で分けた 4 グループの平均スペクトルについては、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ことを確認した。</li> <li>・ データ数については、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ため、1 つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>

<p>③ 地震活動地域 (西日本、東日本) ※参考資料 p.40, 41</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震の発生位置に応じて西日本と東日本の 2 グループに分類した平均スペクトルは、周期 0.6 秒程度以下では東日本の方が若干大きいものの概ね同等のレベルであることを確認した。</li> <li>データ数にも極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
<p>④ 断層タイプ (横ずれ断層、逆断層、正断層) ※参考資料 p.42, 43</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>断層タイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)で分けた 3 グループの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ことを確認した。</li> <li>データ数については、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ため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
<p>⑤ 地震活動タイプ (前震、本震、余震) ※参考資料 p.44~46</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>前震、本震、余震の 3 グループの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ことを確認した(前震はデータ数が顕著に低いので比較対象から除外)。</li> <li>そのうえで、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した。</li> </ul>
<p>⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 ※参考資料 p.47~51</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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た対象地震の震央と活断層の最短距離の範囲で分けた 3 グループについて、周辺に活断層がない場合(距離 15km 以遠)の地震動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こと、また、推定活断層を含む場合には平均スペクトルの差異は小さくなることを確認した。</li> <li>各グループのデータ数については、極端な偏りはないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
<p>⑦ 補正前の震源と観測点の最短距離 ※参考資料 p.52~54</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>補正前の震源と観測点の最短距離の範囲で分けた 4 グループの平均スペクトルについて、震源距離補正の対象となる最短距離 5km 以遠の 3 グループでは地震動レベルの差異が小さくなっており、補正の効果が現れていることを確認した。ただし、補正前の最短距離が近いグループほど平均スペクトルが大きくなる傾向があるため、データの分析を行った。その結果、地震規模(Mw)が大きくなるほど断層面積が大きくなり近距離の記録が増えるため、補正前の最短距離で分けた各グループに含まれる地震の Mw に差異が生じ、それにより平均スペクトルにも差異が生じていることが分かったため、現実的な傾向であると判断した。</li> <li>データ数については、震央距離 30km 以内の記録を収集してしているため、補正前の最短距離が遠い記録ほど多くなる傾向はあるが、震源距離補正を実施しているため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>

<p>⑧ 地中地震計位置の地盤の <math>V_s</math></p> <p>※参考資料 p.55, 56</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中地震計位置の地盤の <math>V_s</math> で分けた 4 グループの平均スペクトルについては、大きな差異は見られないことから、平均レベルに対する地盤物性補正が問題なく施されていることを確認した。一方で、各グループのばらつき（標準偏差）については、地中地震計位置の地盤の <math>V_s</math> が遅くなるほどばらつきが大きくなる傾向があり、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 <math>V_s</math> が遅い地盤の記録を含めることにより、ばらつき（標準偏差）を過大評価する可能性があることが分かった。</li> <li>・なお、地中地震計位置の <math>V_s</math> が元々地震基盤相当に近いデータのみを用いた場合には、統計処理に用いるデータ数が少なくなることから、そのようなデータのみを用いた統計処理結果は標準応答スペクトルの設定の際には使用しないこととした（詳細は参考資料 p.82 を参照）。</li> </ul>
<p>⑨ 地中地震計位置の地震基盤深さ</p> <p>※参考資料 p.57, 58</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地中地震計位置の地震基盤深さで分けた 4 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ことを確認した。</li> <li>・データ数についても極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
<p>⑩ 統計処理に用いる地震の数</p> <p>※参考資料 p.59, 60</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・統計処理に用いる地震数を発生時刻順に最初の 30 地震から 20 地震ずつ（記録は 150 波程度ずつ）増やしていくことにより、4 つのデータセットを作成して比較したところ、大きな差異は見られず、特に約 70 地震を超えると平均と標準偏差はほぼ同等となることを確認した。したがって、89 地震の記録を使用している本検討の統計処理の値は安定しているものと考えられる。</li> </ul>
<p>⑪ 特徴的な地震動</p> <p>※参考資料 p.61~63</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・統計処理に用いたはぎとり波（補正前）の応答スペクトルレベルを距離減衰式による推定値と比較して、距離減衰式の推定値を大きく上回るまたは下回る（周期 1 秒以下で平均<math>\pm 1.5\sigma</math> の範囲外の部分がある）はぎとり波を「特徴的な地震動」として抽出し、特徴的なピーク等を生成する要因によりグループ分けを行った。 <ul style="list-style-type: none"> <li>GroupA：特徴的な地震動ではない。</li> <li>GroupB：観測記録そのものに含まれる特徴（自然要因）による特徴的な地震動。</li> <li>GroupC：自然要因と人工要因の両者の影響による特徴的な地震動。</li> <li>GroupD：はぎとり解析の精度が低いこと（人工要因）により生じた特徴的な地震動</li> </ul> </li> <li>・特徴的な地震動 (GroupB,C,D) とそうでない地震動 (GroupA) の平均スペクトルについては、大きな差異は見られないが、特徴的な地震動のばらつきは大きくなる傾向があることを確認した。また、上下動については、人工要因による特徴的な地震動の割合が高く、水平動よりはぎとり精度が低い傾向があることが分かった。</li> <li>・統計処理においては、人工要因の寄与がある GroupC,D については重みを下げた場合の影響を確認することとした（詳細は 2.5 節を参照）。</li> </ul>

## 2.5 複数条件での非超過確率別応答スペクトルの算出

以下の方針で、対数正規分布を仮定した統計処理により複数条件で非超過確率別応答スペクトルを算出し（図 2.1 参照）、結果の確認を行った〔詳細は参考資料の 7 章(p.67~94)を参照〕。

- ・ 2.4 節のラベル付けによる分析結果を踏まえて、統計処理のデータセットを全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の条件に近づけるために、不確かさを低減させる目的でデータの選別・重み付けを行い複数の算出ケース（5 ケース及び参考・確認用の 4 ケース）を設定する。
- ・ 各ケースについて、データの選別・重み付け後のデータの充足度、不確かさを低減させることによる地震動への影響度合い等の確認を行う。
- ・ 地震動の統計処理においては経験的に対数正規分布を仮定することが一般的であるが、本検討のデータセットへの適用性を確認するために、対数正規分布を仮定した地震動の確率密度分布と実際のデータが整合しているかを確認する。

具体的な非超過確率別応答スペクトルの算出ケース及び対象としたデータの特性は以下のとおりである〔詳細は参考資料の p.70~72 を参照〕。

- ・ ケース 1：全データ  
収集・整理した Mw5.0~6.6 の 89 地震の全ての観測記録を対象とした。なお、補正による影響確認のために以下の参考ケースを設定した。
  - ・ 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）
- ・ ケース 2：対象地震（Mw6.5 未満）  
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、地震のスケーリング則の観点から、Mw6.5 以上で「震源を特定して策定する地震動」と地域性を考慮する「震源を特定せず策定する地震動」にあたる地震を除き、Mw6.5 未満の地震を対象とした。図 2.1 に算出結果を示す。
- ・ ケース 3：規模別の地震・記録数（Gutenberg-Richter 則を想定）  
ケース 1 の Mw5.0~6.6 の地震規模別頻度には偏りや凸凹も見られるため、本ケースでは理想的に G-R 則に従うデータセットとなるように重み付けを施した（詳細は参考資料 p.73 を参照）。

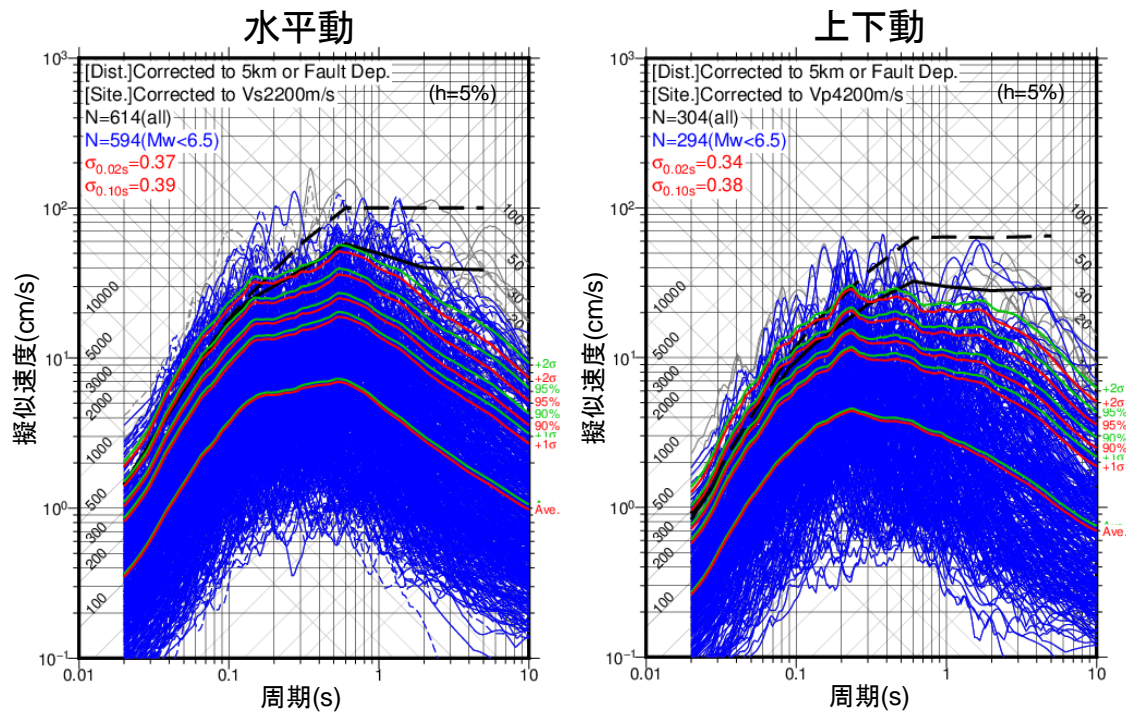


- ケース 4: はぎとり精度 (人工要因による特徴的な地震動の影響を低減)  
 はぎとり解析の精度が低いこと (人工要因) による「特徴的な地震動」がデータセットに含まれている影響を低減させるために、2.4 節の「⑩特徴的な地震動」のラベル付けによる分析結果に基づき、人工要因による特徴を含む Group C, D の地震動記録の重みを 0.5 又は 0 とした。
- ケース 5: 地中地震計位置の地盤の  $V_s$  ( $V_s=2000\text{m/s}$  以上)  
 元々地震基盤相当面に近い地盤で観測された地震動記録のみに絞り、地盤物性補正の不確かさを低減させるために、地中地震計位置の  $V_s$  が  $2000\text{m/s}$  以上<sup>13)</sup>の地震動記録のみを対象とした。  
 なお、ケース 5 は、地盤に関しては理想的な条件であり、非超過確率 97.7% の応答スペクトルレベルは他のケースに比べて小さくなることを確認したが、データの充足度が低いことから標準応答スペクトルの設定には使用しないこととした。
- はぎとり精度の確認用のケース

  - ・ケース 2': ケース 2 ( $M_w6.5$  未満) について、ケース 4 と同様にはぎ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るために、2.4 節の「⑩特徴的な地震動」のラベル付けによる人工要因による特徴を含む Group C, D の地震動記録の重みを 0.5 又は 0 とした。
  - ・ケース 4': 周期 0.5 秒程度以下での はぎとり精度を確認するために、はぎとり解析を行わずに地中観測記録を 2 倍した (重み付けなし)。

---

13) 地震基盤相当面の  $V_s$  は、補正に用いた Noda *et al.* (2002) における定義を参考に  $V_s=2200\text{m/s}$  以上としているが、2.4 節における「⑧地中地震計位置の地盤の  $V_s$ 」のラベル付けによる検討において  $V_s$  を  $1000\text{m/s}$  毎にグループ分けした関係で、ケース 5 の統計処理においては地中地震計位置の  $V_s$  が  $2000\text{m/s}$  以上の場合を元々地震基盤相当面に近い地盤で観測された地震動記録として扱った。



<p><b>&lt;ケース2 (Mw6.5未満)&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 非超過確率別スペクトル</li> <li>— はぎとり波 (水平動では実線: NS成分、破線: EW成分)</li> </ul> <p><b>&lt;ケース1 (全データ)&gt;</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— 非超過確率別スペクトル</li> <li>— はぎとり波 (水平動では実線: NS成分、破線: EW成分)</li> <li>— 加藤スペクトル <ul style="list-style-type: none"> <li>水平動 実線: Vs=2200m/s、破線: Vs=700m/s</li> <li>上下動 実線: Vp=4200m/s、破線: Vp=2000m/s</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>&lt;記号の説明&gt;</b></p> <p>N: データ数</p> <p><math>\sigma_{0.02s}</math>: 周期0.02秒での標準偏差(常用対数)</p> <p><math>\sigma_{0.1s}</math>: 周期0.1秒での標準偏差(常用対数)</p> <p>Ave. = 非超過確率50.0%</p> <p>+1<math>\sigma</math> = 非超過確率84.1%</p> <p>+2<math>\sigma</math> = 非超過確率97.7%</p>
--	---

図 2.1 非超過確率別応答スペクトルの算出例：ケース 2 (Mw6.5 未満) とケース 1 (全データ) の比較

## 2.6 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認

### (1) 標準応答スペクトルの設定

標準応答スペクトル ( $h=5\%$ ) は、次々ページに示す検討チーム会合での議論を踏まえ、以下の方針に基づいて、図 2.2 に示すとおりを設定した [詳細は参考資料の 8.1 節 (p.96~106) を参照]。

- 一部周期帯で加藤ほか(2004)によるスペクトル (以下「加藤スペクトル」という。)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% のスペクトルを上回るレベルとすることを前提とする。
- 短周期側 (周期 1 秒程度以下) の地震動レベルについては、地震規模 Mw5.0 ~6.5 程度の記録を対象として、2.5 節の結果を踏まえて選定した複数条件 (データの充足度が高く不確実さを低減させたケース) での非超過確率 97.7% の応答スペクトルを基に以下の条件で設定する。
  - ・全データセットから Mw6.5 以上で「震源を特定して策定する地震動」と地域性を考慮する「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。ただし、はぎとり精度の確認用ケース [ケース 2'a, b 及びケース 4' (詳細は 2.5 節参照)] により、はぎとり精度が低いと判断した周期帯は必ずしも上回らない。
  - ・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、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 4a, 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% の応答スペクトルとも地震動レベルを比較して確認する。
- 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があることから、妥当性確認結果を踏まえた上で、一定のレベルに設定する。
- 標準応答スペクトルのレベルについて、以下の確認を行うことにより、妥当性を判断する [詳細は (2) を参照]。

- ・標準応答スペクトルに対応する地震動の年超過確率が  $10^{-4}$  と  $10^{-5}$  の間程度<sup>14)</sup>であること。
- ・標準応答スペクトルのレベルが、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。

○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 [例えば、地中地震計位置の地盤の  $V_s$  が 2000m/s 以上の記録のみを統計処理の対象としたケース 5 (参考資料 p.82) 及び、はぎとり精度の確認用ケース 2'a,b、4' (参考資料 p.83~85) では周期 0.5 秒程度以下の地震動レベルが小さくなることを確認していること]、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こととする。

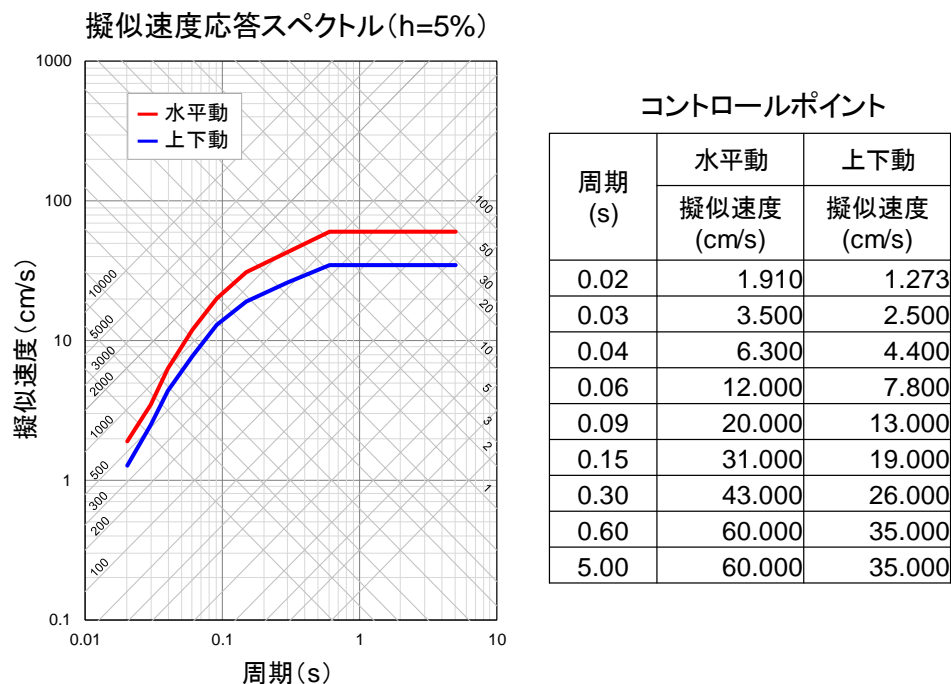


図 2.2 地震基盤相当面 ( $V_s=2200\text{m/s}$  以上) における標準応答スペクトルのコントロールポイント

14) これまでの基準地震動の審査における地震動の年超過確率の参照結果と同等であることを妥当性の判断材料の 1 つと考え、標準応答スペクトルに対応する地震動の年超過確率が  $10^{-4}$  と  $10^{-5}$  の間程度の地震動レベルとなっていることを確認することとした。

#### 【検討チーム会合における議論】

- ・「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」との整合性という観点で、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の上限にあたる **Mw6.5** 程度の地震の地震動レベルで両者の地震動レベルが同等となるような連続性を考慮することが重要である。
- ・「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。
- ・今回の統計処理データセットのみで考えるのではなく、加藤スペクトルによる地震動レベルとの関係を整理しながら検討する必要がある。
- ・標準応答スペクトルは、地震規模 **Mw5.0~6.5** 程度の地震動の非超過確率 **97.7%**（平均+2 $\sigma$ ）を基に設定されている。非超過確率をどの程度の値に設定するかは政策的に決めるものである。標準応答スペクトル設定の際の技術的な留意点として、非超過確率別応答スペクトルは平均+2 $\sigma$ 程度までであれば対数正規分布を仮定した地震動の確率密度分布と実際のデータが整合しているが、それよりも高い非超過確率を採用する場合には統計モデルを再考する必要がある。
- ・本検討チームとは別途の議論として、最終的なプラントに対するリスクを低減させることが大切であるため、将来的にはそのような検討と合わせてスペクトルレベルの設定においてどのようなリスクレベルを許容するのかを考えることも重要である。また、大きな地震動の記録が観測される度に標準応答スペクトルのレベルを更新していくことは現実的ではないと考えられる。例えば、近年、建築の分野では耐震設計基準を大きく上回る地震動が次々に観測されているが、大振幅地震動を観測した地点周辺での最新の耐震設計基準でしっかりと建てられた建物にはほとんど被害が出ていない。したがって、建築分野での現行の耐震設計基準は許容できるリスクレベルを満足していると考えられ、地震動スペクトルレベルは変更されていない。

## (2) 標準応答スペクトルの妥当性確認

新規制基準では地震動の年超過確率の参照を行うことを求めており、また、次々ページに示す検討チーム会合での議論を踏まえ、(1)で設定した標準応答スペクトルについて、「地震動の年超過確率の参照」及び「他の手法による応答スペクトルレベルとの比較」による確認を行った〔詳細は参考資料の 8.2 章(p.107~116)を参照〕。そのうえで、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となっており、さらには「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価と連続性があることを確認することにより、設定したレベルが妥当であると判断した。

### 1) 地震動の年超過確率の参照

地震動の年超過確率<sup>15)</sup>の参照においては、以下の確認を行った。

- ① 審査ガイドの「解説」では「震源を特定せず策定する地震動」の基準地震動の妥当性の確認として、原子力安全基盤機構による地震動の年超過確率別スペクトルを例示していることを踏まえ、原子力安全基盤機構(2005, 2012)による地震動の年超過確率別スペクトルとの比較を行った。図 2.3 に示すように、標準応答スペクトルは、周期 0.3 秒程度以下において年超過確率  $10^{-4}$  と  $10^{-5}$  の間（周期 0.3 秒程度以上では年超過確率  $10^{-5}$  程度以下）のレベルに対応することを確認した〔詳細は参考資料の p.108~111 を参照〕。
- ② 標準応答スペクトルを地震規模 Mw5.0~6.5 程度の地震動の非超過確率 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・整理した地震の発生数から求めた「地震の年発生頻度」と「地震動の年超過確率の考え方」を用いて「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。表 2.4 に示すように、半径 10km の領域で地震動の年超過確率  $1 \times 10^{-4}$  に対応する非超過確率は約 95.2%、年超過確率  $5 \times 10^{-5}$  に対応する非超過確率は約 97.6%と概算され、地震規模 Mw5.0~6.5 程度の地震動の非超過確率 97.7%は年超過確率が  $10^{-4}$  と  $10^{-5}$  の間となる地震動レ

---

15) 本検討における地震動の年超過確率は、Mw6.5 程度未満の地表地震断層が出現しない可能性がある内陸地殻内地震を対象として、地震の発生頻度等を全国平均的に扱って評価したものであり、海溝型地震や Mw6.5 程度を超える内陸地殻内地震等は含まない。原子力安全基盤機構(2005, 2012)による地震動の年超過確率の評価においても本検討と同様に内陸地殻内の震源を特定しにくい地震を対象としている。

ベルであることを確認した〔詳細は参考資料の p.112~114 を参照〕。なお、「地震動の年超過確率の考え方」に基づく概算に用いた「地震の年発生頻度」は過去 18 年間の観測に基づくものであるため、過去 85 年間程度の観測に基づく既往研究による地震の年発生頻度を用いた場合も同等の結果が得られることを確認した。

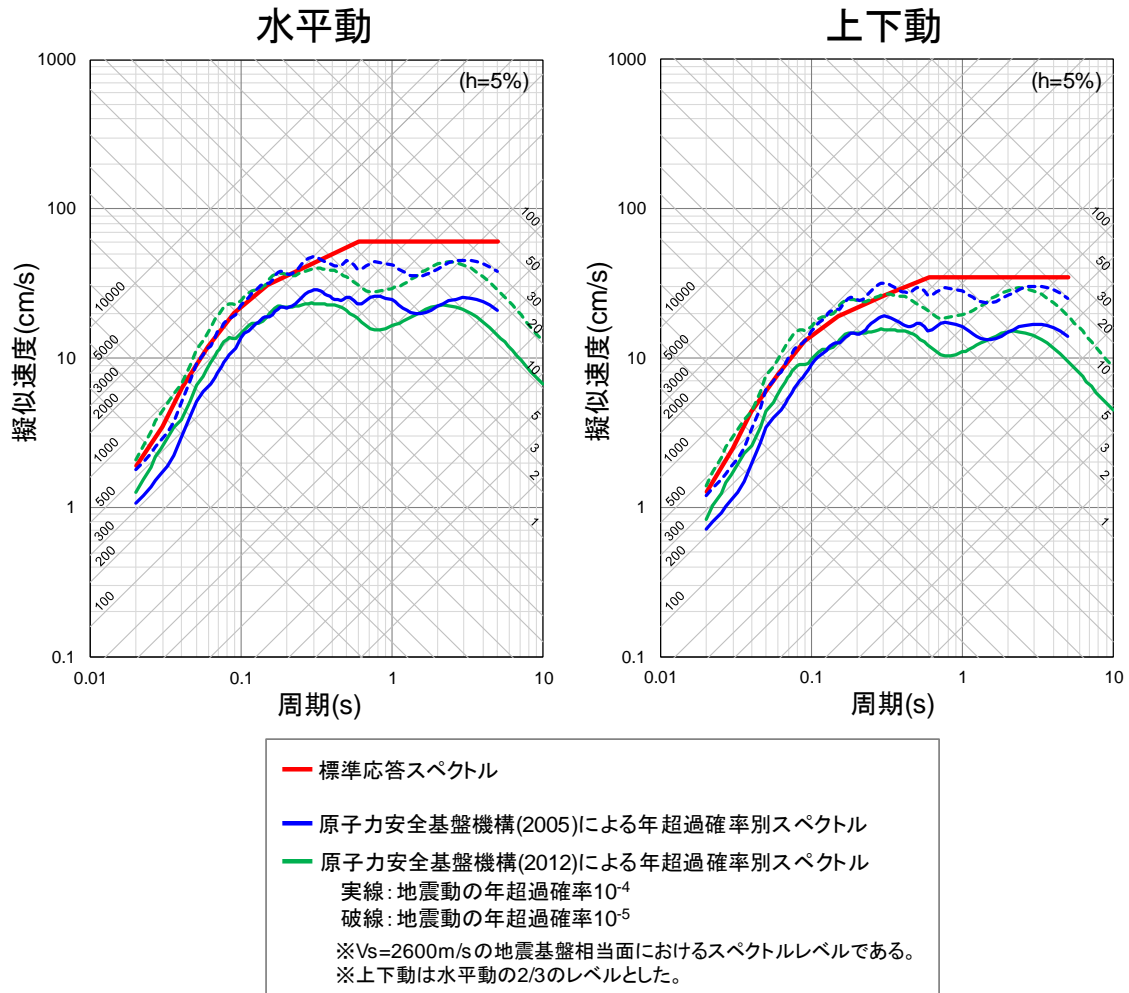


図 2.3 標準応答スペクトルと原子力安全基盤機構(2005, 2012)による地震動の年超過確率の比較

表 2.4 「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 <sup>2</sup> )	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	$1 \times 10^{-4}$	0.048	4.8%	0.952	95.2%
			$5 \times 10^{-5}$	0.024	2.4%	0.976	97.6%
			$1 \times 10^{-5}$	0.005	0.5%	0.995	99.5%

※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  $P \approx A \times B$  と近似することが可能) という考え方に基づいて概算した結果である。

## 2) 他の手法による応答スペクトルレベルとの比較

他の手法により求められた以下の応答スペクトルとの比較を行った〔詳細は参考資料の p.115, 116 を参照〕。

- ① 距離減衰式による推定値
- ② 断層モデル法による計算結果
- ③ 審査関連の地震動レベル

### ① 距離減衰式による推定値

地震基盤で適用可能な以下の 3 つの距離減衰式を用いて、Mw6.5 相当の地震の震源近傍での地震基盤相当面における応答スペクトルを算出し、標準応答スペクトルと比較した（図 2.4 参照）。

- ・ Noda *et al.* (2002)： 現状の審査で使用されている式
- ・ 原子力安全基盤機構(2013)： 震源距離補正で使用した式
- ・ Idriss (2014)： 米国 NGA-West2 の式の 1 つ（水平動のみ）

標準応答スペクトルの水平動の周期 0.6 秒程度以下については、新規制基準適合性審査において 2007 年新潟県中越沖地震の知見を踏まえて「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の策定の際に保守性を考慮するために採用されている Noda *et al.* (2002)による距離減衰式の「補正なし」の推定値と概ね同等のレベルとなっていることを確認し、「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した。

また、標準応答スペクトルは全周期帯について、原子力安全基盤機構(2013)及び Idriss (2014)の距離減衰式による推定値の平均+標準偏差(1 $\sigma$ )をやや上回るレベルとなっており、対象地震規模の上限に近い Mw6.5 の地震動にばらつきを考慮したレベルとなっていることを確認した。

### ② 断層モデル法による計算結果

原子力安全基盤機構(2012)による断層モデル法を用いた計算〔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〕により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〔気象庁マグニチュード(Mj) 6.5 (Mw6.2 相当) 及び Mj6.9 (Mw6.5 相当)、断層最短距離 10km 以内〕を標準応答スペクトルと比較した。断層モデル法による計算結果には、平面的に見た場合には半径 10km の領域よりも遠くに位置して地震動レベルが低くなる計算結果も含まれるため、本検討の想定とは異なるが、標準応答スペクトルは原子力安全基盤機構(2012)による計算結果の平均+1 $\sigma$ を上回ることを確認した。



### ③ 審査関連の地震動レベル

新規制基準及び旧原子力安全委員会の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下「耐震設計審査指針」という。）に基づく審査で使用された以下の地震動レベルと標準応答スペクトルを比較した（図 2.5 参照）。

- ・2004年北海道留萌支庁南部地震（Mw5.7）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\*：新規制基準審査（硬岩サイトで使用）
- ・加藤スペクトル：改訂耐震設計審査指針関連
- ・大崎の手法によるスペクトル（Mj6.5、震源距離 10km）\*：改訂前の旧耐震設計審査指針関連

\*解放基盤面における地震動レベルであるため、地震基盤面相当の標準応答スペクトルとは直接比較ができないことに留意。

標準応答スペクトルの設定方針として短周期側（周期 1 秒程度以下）では加藤スペクトルを上回ることを前提としたが、結果的には標準応答スペクトルは全周期帯において加藤スペクトルを上回ることを確認した。

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（硬岩サイトで使用されているレベル）については、解放基盤面における地震動レベルであり地盤条件が異なるために直接比較はできないが、参考のために標準応答スペクトルとの比較を行った。水平動については、周期 0.2 秒程度以下及び周期 2 秒程度以上では標準応答スペクトルの方が概ね大きな地震動レベルとなる<sup>16)</sup>が、周期 0.2～2 秒程度では K-NET 港町観測点の地震動の方が大きなレベルとなる。この特徴には、標準応答スペクトルが地震基盤相当面（ $V_s=2200\text{m/s}$  以上）における地震動であるのに対し、K-NET 港町観測点の地震動は  $V_s=938\text{m/s}$  の解放基盤面における地震動であることにより、震源特性に加えて当該観測点における地盤増幅特性（地域的な特性）が影響している可能性が考えられる [例えば、主要原子力施設設置者(2018a)、佐藤ほか(2013)]。上下動については、水平動と同様に地盤条件は異なるが、周期 0.1 秒及び 0.3～0.4 秒付近を除いては標準応答スペクトルの方が大きな地震動レベルとなる。

また、この K-NET 港町観測点の地震動に対して、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<sup>16)</sup>、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

---

16) 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。

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(参考資料の付録 D を参照)。

なお、2004 年北海道留萌支庁南部地震については、本検討の統計処理においても検討対象とし、KiK-net 小平西 (RMIH05) 及び KiK-net 小平東 (RMIH04) の 2 観測点の地震動記録を使用した。

大崎の手法によるスペクトルについても、解放基盤面における地震動レベルであり地盤条件が異なるが、参考のために比較を行い、全周期帯において標準応答スペクトルが同等又は大きな地震動レベルとなることを確認した。

#### 【検討チーム会合における議論】

- ・「震源を特定せず策定する地震動」の地震動レベルについては、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち震源近傍で **Mw6.5** にわずかに満たない規模の地震に対して不確かさを考慮して策定される地震動レベルとの連続性(整合性)を考慮する必要がある。
- ・**Mw6.5** クラスの地震には、ディレクティビティ(破壊伝播の指向性)効果や上盤効果等の地震動のばらつきを大きくする要素があるが、統計処理におけるデータにはそのような記録が不足している可能性がある。それらをシミュレーションで補うことも考えられるが、地震動予測手法(レシピ)などを使うと、ばらつきが大きくなり現実的ではない地震動となる可能性も考えられるため、既往文献による距離減衰式やばらつきを見込んだシミュレーションの結果を参照することが望ましい。
- ・標準応答スペクトルの設定は、これまでの審査で採用されてきた距離減衰式との整合性や、旧耐震設計審査指針に基づく基準地震動の位置づけ等も考えながら検討する必要がある。

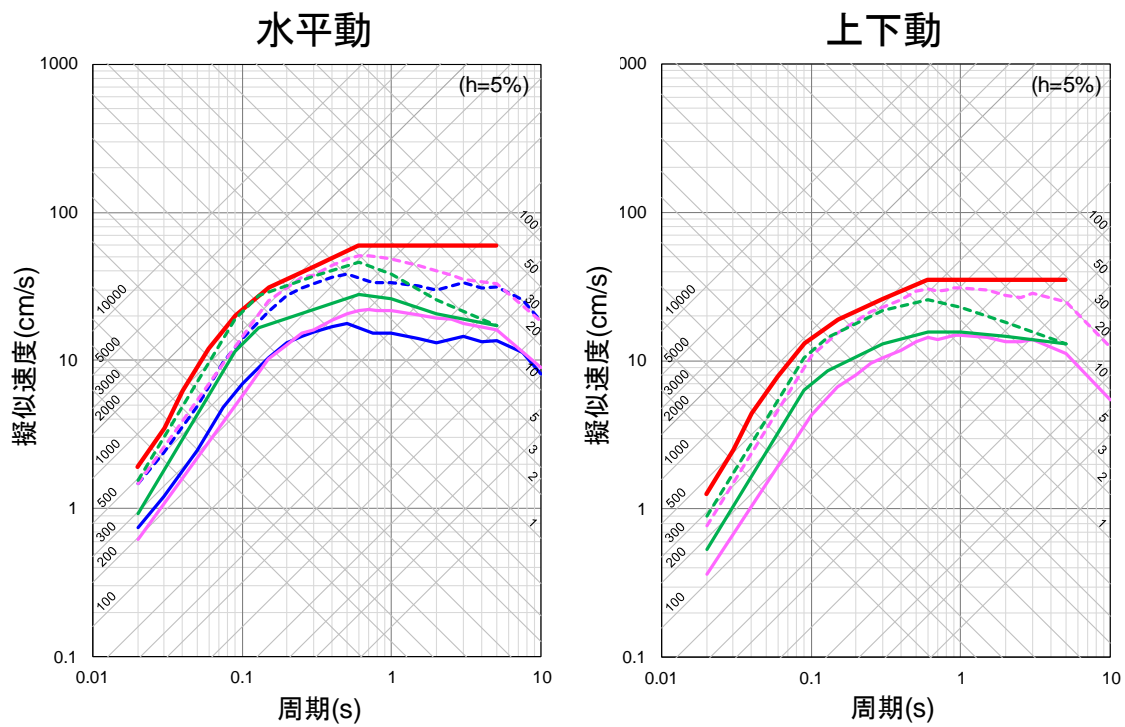


図 2.4 標準応答スペクトルと距離減衰式による推定値の比較

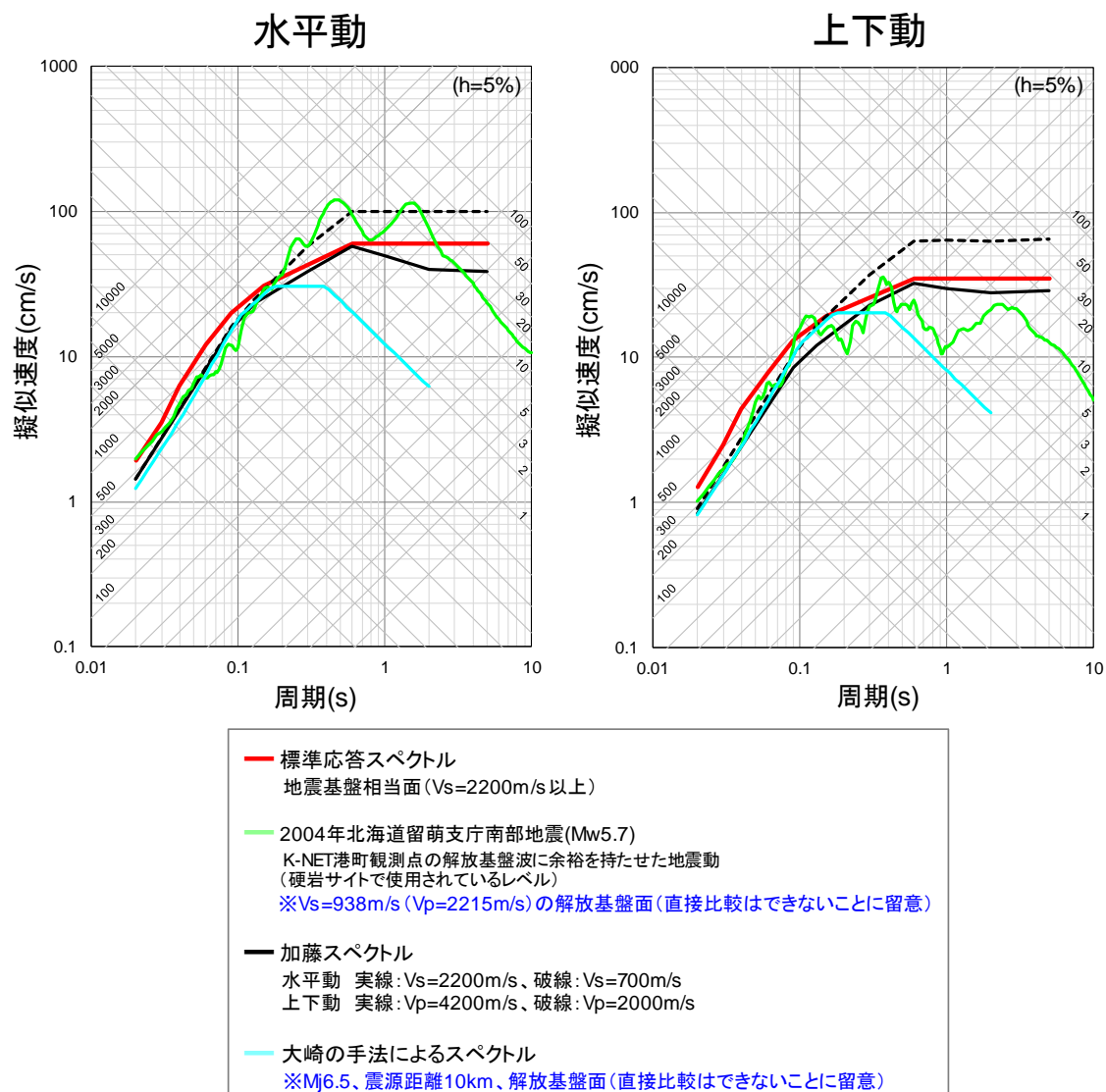


図 2.5 標準応答スペクトルと審査関連の地震動レベルの比較

## 2.7 時刻歴波形の作成方法

新規基準では、「震源を特定せず策定する地震動」について、解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して時刻歴波形を作成する際には、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。

検討チーム会合においては、全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」における時刻歴波形（模擬地震波）の作成方法について、これまでの審査における事例に加え、他分野における事例を提示したうえで、時刻歴波形の作成方法に関して整理するとともに、審査ガイドの改定において留意すべき点について議論した〔詳細は参考資料の9章(p.117~134)を参照〕。なお、時刻歴波形は事業者が作成し、その妥当性が審査で確認されることとなる。

### (1) 作成事例

これまでの審査における事例から、観測記録を用いた作成事例及び正弦波の重ね合わせによる時刻歴波形の作成事例を提示した。また、鉄道構造物、道路橋、ダム等の他分野における時刻歴波形の事例を紹介し、議論を行った。

### (2) 作成方法

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」における時刻歴波形の作成については、以下のような方法があることを整理して、議論を行った。

- ① これまでの審査実績を踏まえて、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が考えられる。
- 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、震源近傍において観測された実観測記録を用いる方法が考えられる。
- ③ 他分野の事例も踏まえて、地震動の非定常性、断層破壊過程等を考慮した、群遅延時間を用いる方法等も考えられる。

### (3) 審査ガイドの改定において留意すべき点

今後の審査ガイドの改定の際には、検討チーム会合において、(1)、(2)に基づき次ページに示すような議論があったことに留意する必要がある。

#### 【検討チーム会合における議論】

- ・弾塑性の時刻歴応答解析においては位相の与え方にも留意する必要がある。
- ・「震源を特定せず策定する地震動」は、新規制基準において観測記録を基に策定されている旨の記載がなされていることから、加速度時刻歴波形の位相は、できるだけ観測記録に近いものを使うことが重要と考えられる。
- ・そのサイトで観測された記録を重視するという考えは良い。ただし、実観測記録を用いて加速度時刻歴波形を作成する際には、小さなマグニチュードの地震から得られた位相特性がそのまま使えるか等の整理が必要である。
- ・断層の近傍では指向性パルス<sup>17)</sup>が生じる可能性があり、今後、Mw6.5程度の地震でパルス波が発生する可能性も考慮しておくことが望ましい。
- ・ある地点の一つの波の位相を用いると、その記録のサイト特性が際立つため、標準応答スペクトル策定の考え方との整合性がなくならないように留意する必要がある。
- ・加速度時刻歴波形を作成する際には、最大加速度よりも、応答スペクトルにフィッティングさせることが大切である。

---

17) 「指向性パルス」とは、震源断層の近傍の観測点において、断層面を伝播するすべり破壊が近づいて来る場合に、断層各点から発生するパルス状の強震動（要素パルス）が重なり合うことによって生成される大きな振幅のパルス状の波であり、一般に周期 1～2 秒程度以上の長周期側の応答スペクトルに影響を与える。1995 年兵庫県南部地震の際、神戸市では六甲断層帯の走向に直交する北北西-南南東方向に多くの建物をなぎ倒すような強烈的な強震動が観測されたが、指向性パルスがその成因のひとつと考えられている（その破壊力からキラーパルスとも呼ばれた）。

## 2.8 標準応答スペクトルに係る将来の課題

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、検討チーム会合において、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を議論した。

- ・ 収集可能な地震・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

検討チーム会合における議論を踏まえ、将来の課題については、以下のような調査・研究を中長期的に行っていくことが重要と考えられる。

### （1）収集可能な地震・記録数

日本国内の内陸地殻内地震を対象としているが、KiK-netによる地中観測記録を収集対象としているため、2000年以降の18年間の記録に限られており、地震が発生した地域に偏りもある〔詳細は参考資料のp.38, 39を参照〕。また、解析に採用したデータセットの規模別の地震・記録数は概ねG-R則に従っていることを確認しているが、データセットにおいて地震規模に偏りや凸凹も少なからず見られる〔詳細は参考資料のp.17, 73を参照〕。中長期的な取り組みとして、新たに（2018年以降に）起きた収集対象地震の地震動記録の分析を行い、定期的に標準応答スペクトルへの影響の確認等を行っていくことが重要と考えられる。

### （2）はぎとり解析の精度

2.4節における「⑩特徴的な地震動」のラベル付けに基づく整理によって、はぎとり解析の精度が低いことにより特徴的なピーク等（地震動を上凸に増幅させる場合が多い）が生じることが確認されたため、中長期的にはぎとり解析の精度の向上に係る調査・研究を行っていくことが重要と考えられる。特に、水平動と比較してはぎとり精度が低い傾向がある上下動について留意する必要がある。

### （3）応答スペクトルの補正（震源距離、地盤物性）

震源距離補正については、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の補正を実施する必要があり、補正方法や設定に伴い結果が変動する可能性がある。本検討における補正では結果が保守的になるような工夫をしているが、手法の高度化に向けた中長期的な調査・研究も行っていくことは重要と考えられる。

地盤物性補正の手法については、地中地震計位置の地盤の  $V_s$  のラベル付け（詳細は 2.4 節参照）により、統計処理で扱う地震動の平均レベルを補正する観点では問題ないことを確認しているが、補正に用いた経験式が 2002 年の文献に基づくため、最近の記録を用いてその妥当性を確認する等の中長期的な調査・研究を行っていくことが重要と考えられる。

#### （４）妥当性の確認に用いる距離減衰式

標準応答スペクトルの妥当性確認で比較対象とする距離減衰式については、最近の観測記録に基づいた距離減衰式の研究開発が国内外で進んでいることを踏まえて、継続的に調査・確認を行っていくことが重要と考えられる。



### 3. 事業者意見の聴取

本検討チーム会合において、標準応答スペクトル等に係る検討に対する事業者からの意見を聴取した。

技術的観点からの意見として、取り組みの方針、検討プロセスを含む検討内容、策定した標準応答スペクトル等に対する異論はないとのことであったが、以下の点については、これまでの規制において取り扱われていなかった内容であるので、審査ガイド等においては、その背景、技術的な位置づけ等が示されるとともに、事業者における検討において、観測記録等の最新の知見・データ等による幅広い検討に基づく評価が可能となるように、選択肢が限定されないようにしてほしいとの要望があった。

- ・標準応答スペクトルを用いた地震動の検討における「地震基盤相当面（ $V_s=2200\text{m/s}$  以上）」
- ・標準応答スペクトルに対する地震基盤相当面から解放基盤面における敷地の地盤増幅特性の反映方法
- ・時刻歴波形（模擬地震波）の策定方法

## 4. まとめ

本検討チームでは、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で、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の策定等の検討を行った。検討概要は以下のとおりである。

### (1) 対象地震の観測記録の収集・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整理した(表2.1参照)。

### (2) はぎとり解析及び応答スペクトルの補正

収集・整理した89地震の地中観測記録(水平動614記録、上下動304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。

### (3) 統計処理に用いる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、断層のタイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)、地中地震計位置の地盤の $V_s$ 、統計処理に用いる地震の数等の地震特性、観測条件に係る情報を整理(ラベル付け)してグループ分けを行った。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(表2.3参照)。

### (4) 標準応答スペクトルの設定及び妥当性確認

標準応答スペクトルは、主に以下の方針で、地震規模Mw5.0～6.5程度の地震動記録を対象として、対数正規分布を仮定した統計処理により算出した

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：図 2.1 参照）での非超過確率 97.7%の応答スペクトルを基に設定した（図 2.2 参照）。

- ・ 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。
- ・ 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（図 2.3～図 2.5、表 2.4 参照）。

#### （5）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時刻歴波形（模擬地震波）について、作成方法とその留意点に関して議論を行った。

#### （6）標準応答スペクトルに係る将来の課題

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、検討チーム会合において、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を議論した。

- ・ 収集可能な地震・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,  
<<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」。
- 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.
- 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.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2017): 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 平成29年(2017年)4月,  
<[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17\\_yosokuchizu/recipe.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf)>.
- 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—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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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)

(2018a): 「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、平成 30 年 2 月 22 日 第 2 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、資料 1, <<https://www.nsr.go.jp/data/000220801.pdf>>.

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)

(2018b): 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>>.

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.

# 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム 構成員名簿

令和元年 8 月 7 日現在

## 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 J R 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

## 原子力規制庁職員

櫻田 道夫 原子力規制技監  
山田 知穂 原子力規制部長〔令和元年 7 月 8 日まで〕  
大浅田 薫 原子力規制部安全規制管理官（地震・津波審査担当）  
小林 恒一 技術基盤グループ安全技術管理官（地震・津波担当）  
〔平成 31 年 3 月 31 日まで〕、  
技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官  
〔平成 31 年 4 月 1 日から〕  
御田 俊一郎 原子力規制部地震・津波審査部門 安全管理調査官  
川内 英史 技術基盤グループ地震・津波研究部門 首席技術研究調査官  
〔令和元年 7 月 11 日まで〕、  
技術基盤グループ安全技術管理官（地震・津波担当）  
〔令和元年 7 月 12 日から〕  
飯島 亨 技術基盤グループ地震・津波研究部門 首席技術研究調査官  
小林 源裕 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官  
儘田 豊 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官  
谷 尚幸 原子力規制部地震・津波審査部門 主任安全審査官  
佐口 浩一郎 原子力規制部地震・津波審査部門 主任安全審査官  
藤田 雅俊 技術基盤グループ地震・津波研究部門 技術研究調査官  
田島 礼子 技術基盤グループ地震・津波研究部門 技術研究調査官

## 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム 開催履歴

会合回数	開催日	主な議題
第1回	平成30年1月25日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「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</li> <li>・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</li> <li>・「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</li> </ul>
第2回	平成30年2月22日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・他分野における検討事例について</li> <li>・第1回会合における議論の整理</li> </ul>
第3回	平成30年3月30日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・観測記録の補正（震源距離及び地盤物性）について</li> <li>・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</li> </ul>
第4回	平成30年6月14日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理について</li> <li>・予備検討結果の紹介及び今後の方針について</li> <li>・今後のスケジュールについて</li> </ul>
第5回	平成30年10月4日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・震源を特定せず策定する地震動の時刻歴波形について</li> </ul>
第6回	平成30年11月8日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・対象地震動記録の検討状況について</li> </ul>
第7回	平成31年3月4日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・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</li> </ul>
第8回	平成31年3月29日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検討チーム会合に対する事業者意見について</li> <li>・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</li> </ul>
第9回	令和元年5月10日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・本検討で対象とした地震動のデータセットについて</li> <li>・検討結果の取りまとめについて</li> </ul>
第10回	令和元年7月8日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでの会合における議論の整理</li> <li>・検討結果の取りまとめについて</li> </ul>
第11回	令和元年8月7日	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検討結果の取りまとめについて</li> </ul>