



リサイクル燃料備蓄センター 使用済燃料貯蔵事業変更許可申請

標準応答スペクトルを考慮した評価について

令和4年4月14日
リサイクル燃料貯蔵株式会社

コメントリスト

番号	項目	指摘日	コメント内容
1	地震	2022年 2月4日	一様乱数位相を用いた模擬地震波の作成について、地震規模Mの設定を見直し再度提示すること。
2	地震	2022年 2月4日	一様乱数位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波を比較し、一様乱数位相を用いた模擬地震波を採用している根拠を説明すること。

目次

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の方針	.....	3
2. 地盤モデルの設定	.....	4
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討	.....	5
4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討	.....	14
5. 基準地震動の策定	.....	19

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の方針

- 敷地における解放基盤表面は $V_s=700\text{m/s}$ 以上となる標高 -218m の位置に設定しているのに対し、標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層) で定義される。
- 地震基盤面から解放基盤表面までの増幅幅特性の評価は、断層モデルによる地震動評価で用いている、モデル下端が地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) となる「統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル」によることとする。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ
 1. 地盤モデルの設定
地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) から解放基盤表面 ($V_s=700\text{m/s}$ 以上) までの増幅特性を考慮する地盤モデルとして、断層モデルによる地震動評価で用いた「統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル」を用いる。
 2. 地震基盤面における模擬地震波の検討
地震基盤面において標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を一様乱数位相を用いて作成するとともに、実観測記録の位相を用いた模擬地震波を作成する。
 3. 解放基盤表面における模擬地震波の検討
地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) に標準応答スペクトルに適合するように作成した2つの模擬地震波を入力し、解放基盤表面における模擬地震波を作成し、両者の比較を行い代表模擬地震波を決定する。
 4. 基準地震動の策定
上記の検討を踏まえ、既許可の基準地震動 S_s との大小関係を考慮して基準地震動 S_s を策定する。

2. 地盤モデルの設定

■地震基盤面から解放基盤表面までの増幅幅特性の評価に用いる地盤モデルは、敷地の地震動評価の内、「海洋プレート内地震」及び「内陸地殻内地震」の断層モデルによる地震動評価に用いた「統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル」を用いることとする。

■評価に用いた地盤モデルを下表に示す。

統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル

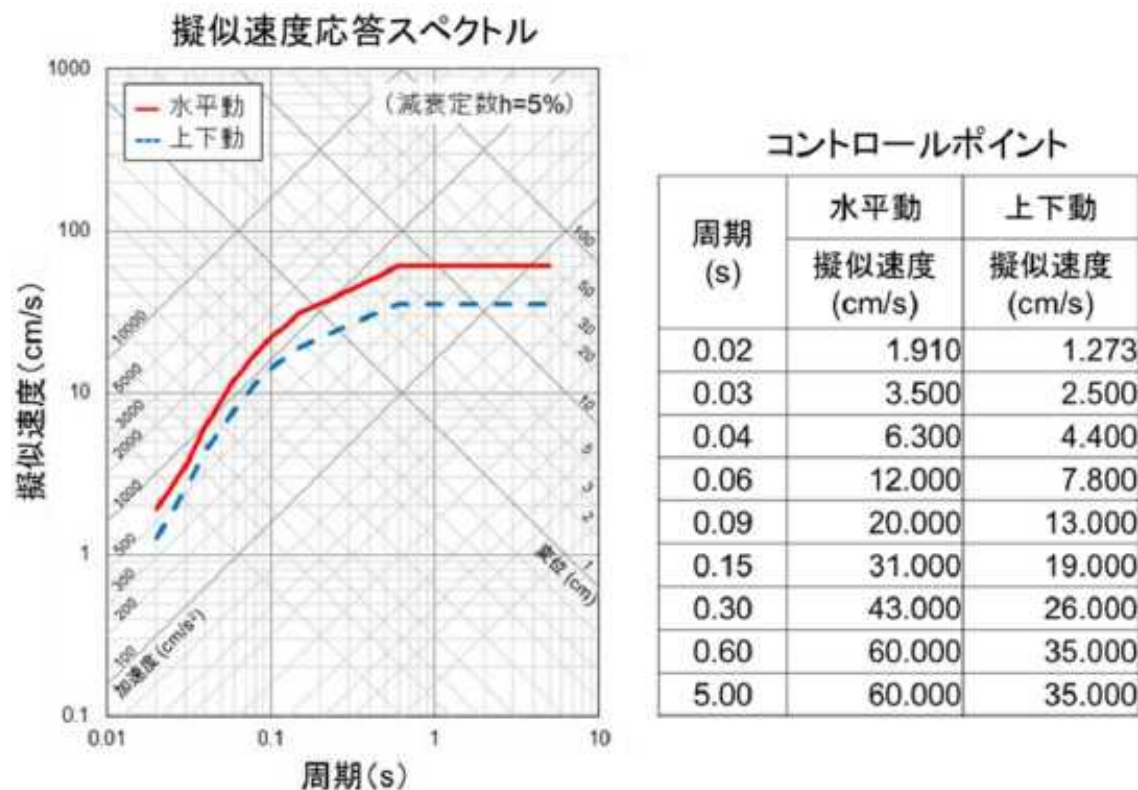
標高 T. P. (m)	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_S (m/s)	P波速度 V_P (m/s)	減衰 (%)	備考
-218	82	2.00	910	2197	1.00	解放基盤表面
-300	180	2.10	990	2510		
-480	1220	2.20	1450	2820		
-1700	∞	2.60	3150	5660	—	地震基盤面

3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

■ 地震基盤面における模擬地震波の策定に当たっては、下図の標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を一様乱数位相を用いて作成している。

■ 模擬地震波の作成に当たっては、実観測記録の位相を用いた模擬地震波との比較検討を行う。

- 1) 一様乱数位相: 基準地震動 S_s-A の作成に用いた手法と同じ手法で作成した一様乱数位相
- 2) 実観測記録の位相: 発生様式が内陸地殻内地震で、敷地内の地震観測点で記録が得られている実観測記録の位相



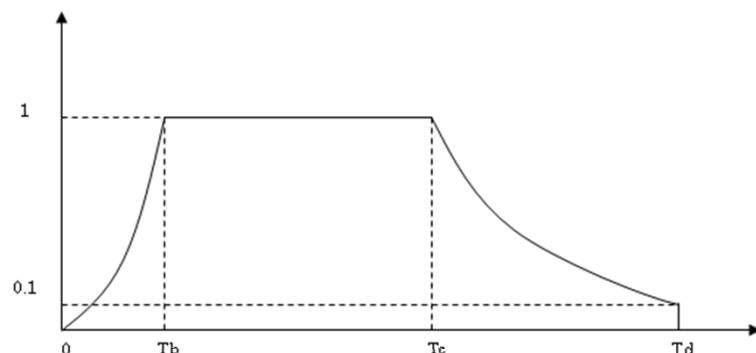
標準応答スペクトル

3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

一様乱数位相を用いた模擬地震波の作成 1/2

- 模擬地震波は、応答スペクトルに適合するよう、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせによって作成する。
- 振幅包絡線の経時変化は、Noda et al. (2002)に基づき設定している。

模擬地震波	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時変化 (s)		
		T_b	T_c	T_d
一様乱数位相を用いた 模擬地震波	29.80	3.72	16.31	29.80



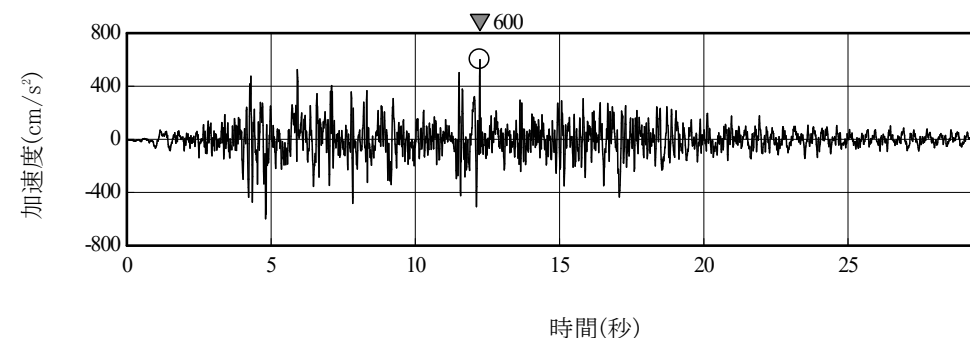
$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

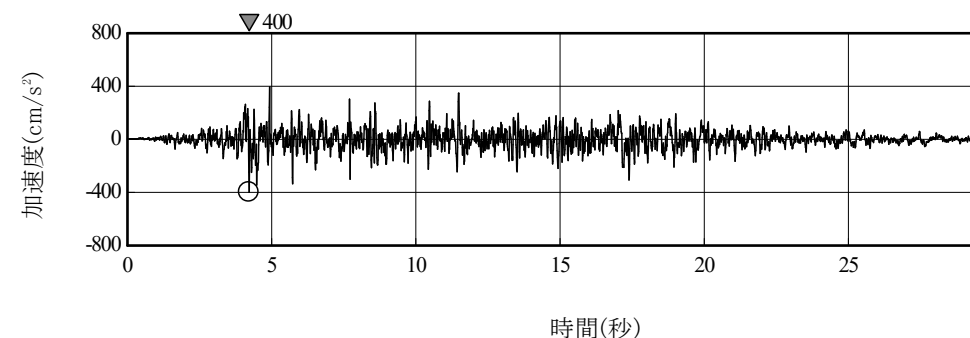
$$T_d - T_c = 10^{0.17M+0.54\log X_{eq}-0.6}$$

地震規模 (M)、等価震源距離 (X_{eq}) については、M 7.0、 $X_{eq}=10\text{km}$ とする。

継続時間及び振幅包絡線の経時変化



模擬地震波の加速度時刻歴波形 (地震基盤面) 水平方向



模擬地震波の加速度時刻歴波形 (地震基盤面) 鉛直方向

模擬地震波	最大加速度 (cm/s^2)
水平方向	600
鉛直方向	400

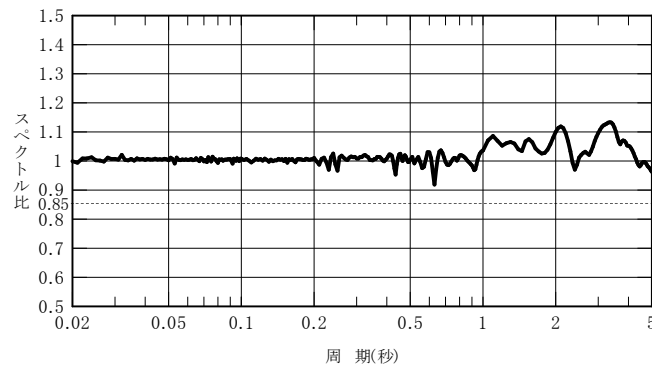
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

一様乱數位相を用いた模擬地震波の作成 2/2

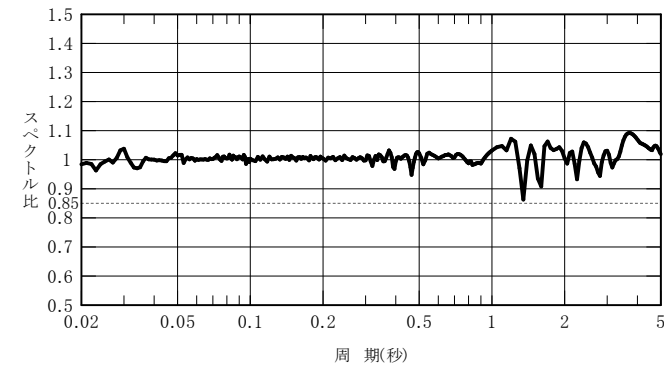
■ 作成した模擬地震波が、JEAG4601-2008原子力発電所耐震設計技術指針に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認した。

- 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比が全周期帯で0.85以上
- 応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上

■ 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比



応答スペクトル比(水平方向)



応答スペクトル比(鉛直方向)

■ 応答スペクトル強さの比(SI比)

$$SI \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} Sv(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{Sv}(T) dt}$$

SI : 応答スペクトル強さ
 $Sv(T)$: 模擬地震波の擬似速度応答スペクトル(cm/s)
 $\bar{Sv}(T)$: 目標とする応答スペクトル(cm/s)
 T : 固有周期(s)

応答スペクトル	SI比
水平方向	1.038
鉛直方向	1.012

3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成 1/3

- 実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成に用いる記録の選定
はじめに、敷地内の3つの観測点(西側, 北側, 南側)のうち, 西側観測点の標高-300mにおいて地震観測記録が得られている地震の中から, 下記の抽出条件により検討対象地震を選定した。

抽出条件

観測点	敷地西側観測点(2001年7月～)
地震の震央距離	敷地より30km程度(以内)の地震
震源深さ	0km～30km
地震規模(M)	3.5以上

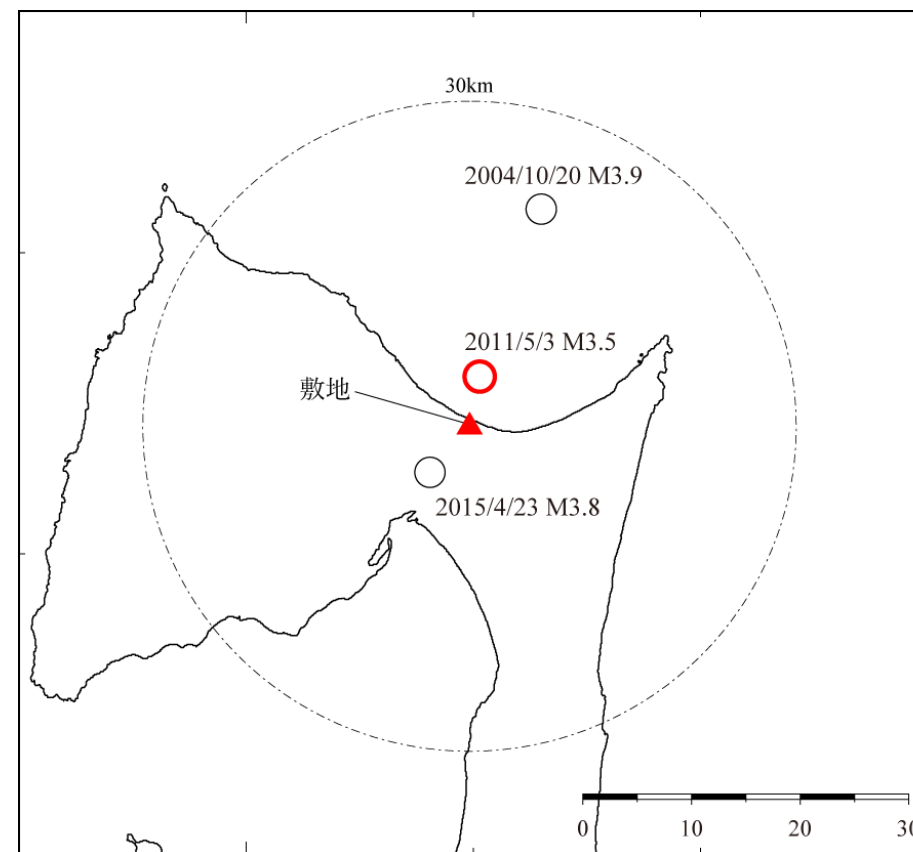
検討対象地震

No	地震名	発生日	M	深さ(km)	震央距離(km)	地震発生様式
1	津軽海峡の地震	2004年10月20日	3.9	8	21	内陸地殻内地震
2	下北半島の地震	2011年5月3日	3.5	7	5	内陸地殻内地震
3	下北半島の地震	2015年4月23日	3.8	7	6	内陸地殻内地震

次いで、

- ・敷地までの震央が5kmと敷地に近いこと
- ・最大加速度振幅値が最も大きいこと

により、「2011年5月3日(05:15)に発生した下北半島の地震(Mj3.5、Mw3.6)」を選定した。

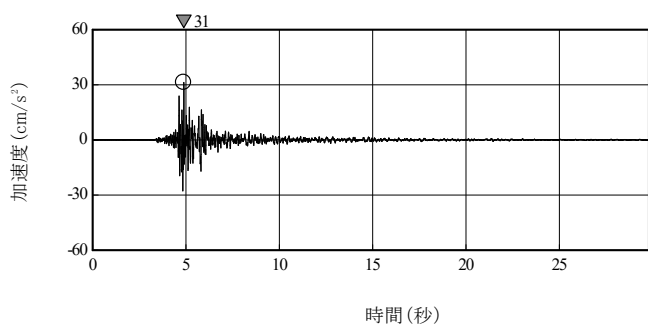


検討対象地震の位置

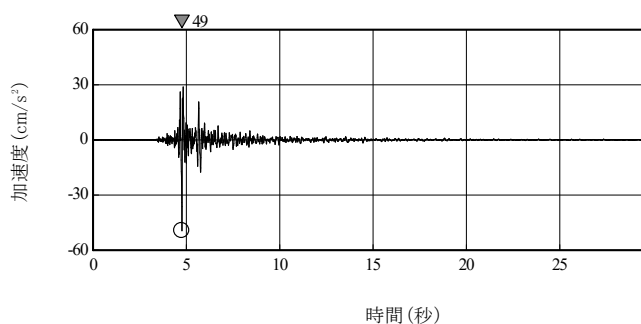
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成 2/3

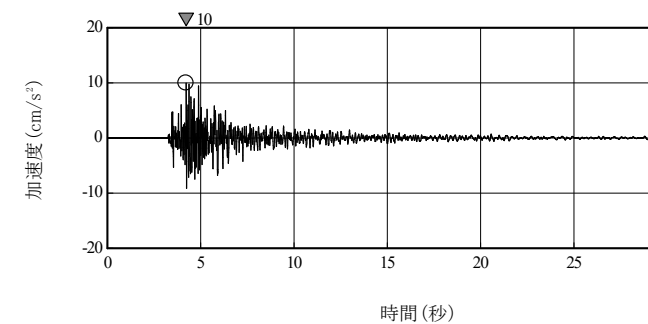
■ 2011年5月3日(05:15)に発生した下北半島の地震の位相を用いて作成した模擬地震波を以下に示す。



NS方向

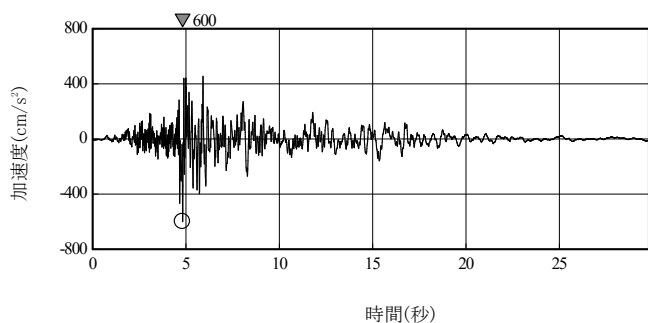


EW方向

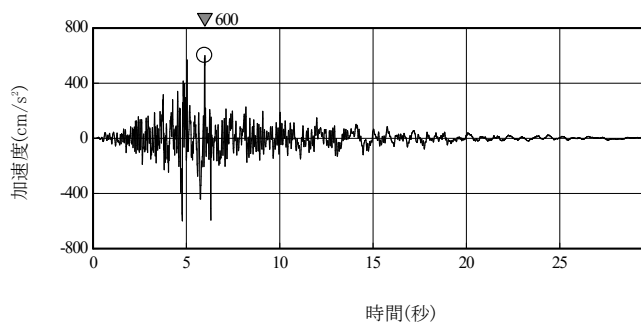


UD方向

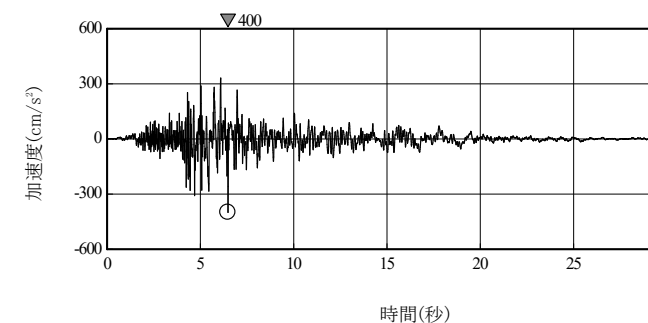
地震観測記録の加速度時刻歴波形(標高-300m)



NS方向



EW方向



UD方向

模擬地震波の加速度時刻歴波形(地震基盤面)

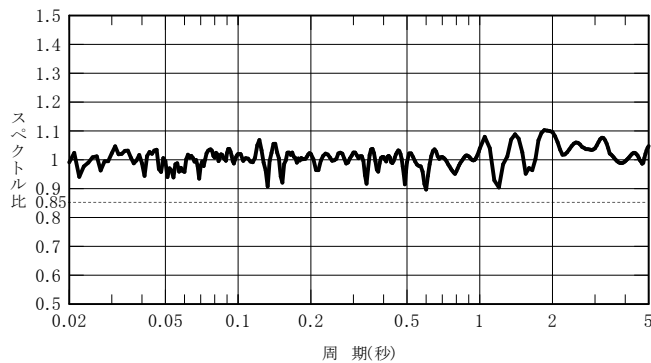
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

実観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成 3/3

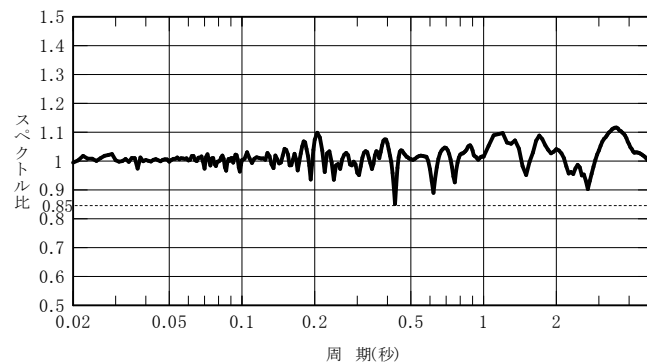
■ 作成した模擬地震波が、JEAG4601-2008原子力発電所耐震設計技術指針に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認した。

- 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比が全周期帯で0.85以上
- 応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上

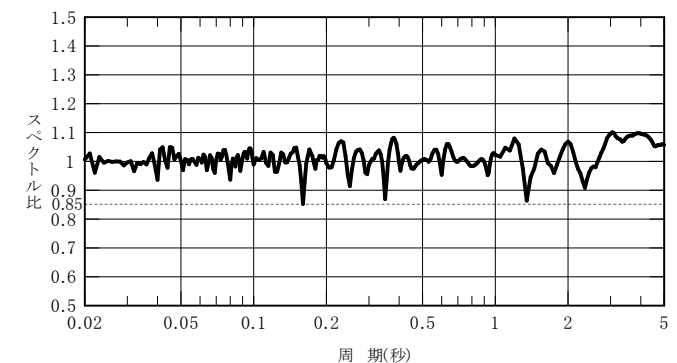
■ 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比



応答スペクトル比(NS方向)



応答スペクトル比(EW方向)



応答スペクトル比(UD方向)

■ 応答スペクトル強さの比(SI比)

$$SI \text{ 比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} Sv(T)dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{Sv}(T)dt}$$

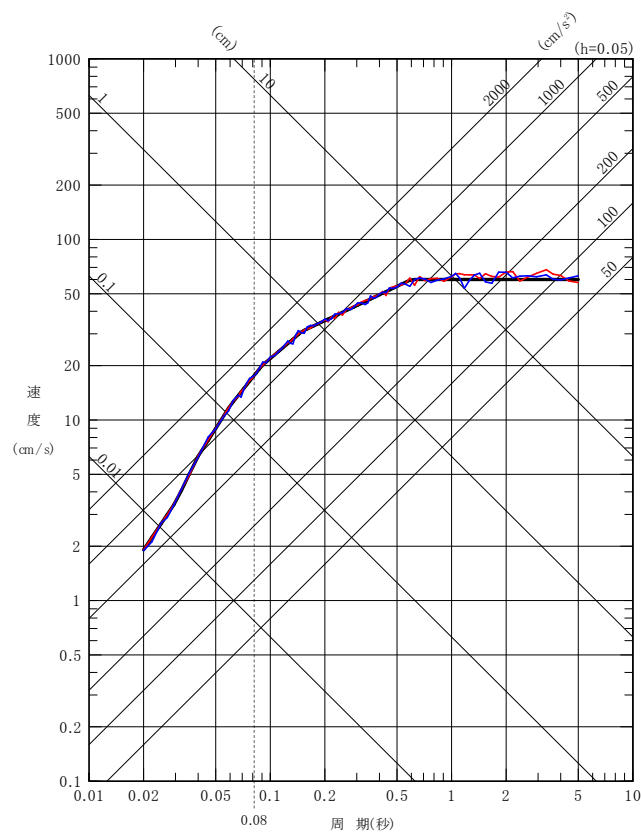
- SI : 応答スペクトル強さ
 $Sv(T)$: 模擬地震波の擬似速度応答スペクトル(cm/s)
 $\bar{Sv}(T)$: 目標とする応答スペクトル(cm/s)
 T : 固有周期(s)

応答スペクトル	SI比
NS方向	1.022
EW方向	1.022
UD方向	1.001

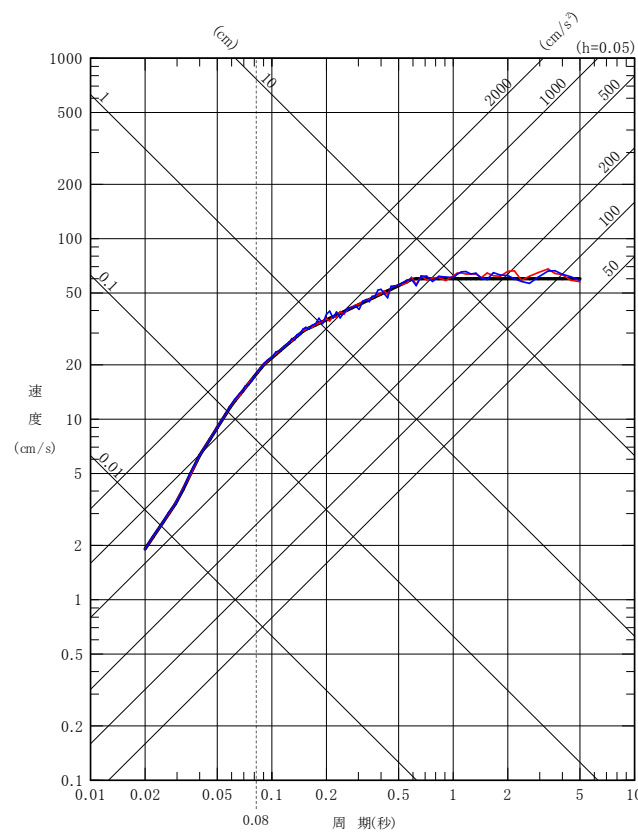
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

地震基盤面における模擬地震波の応答スペクトルの比較

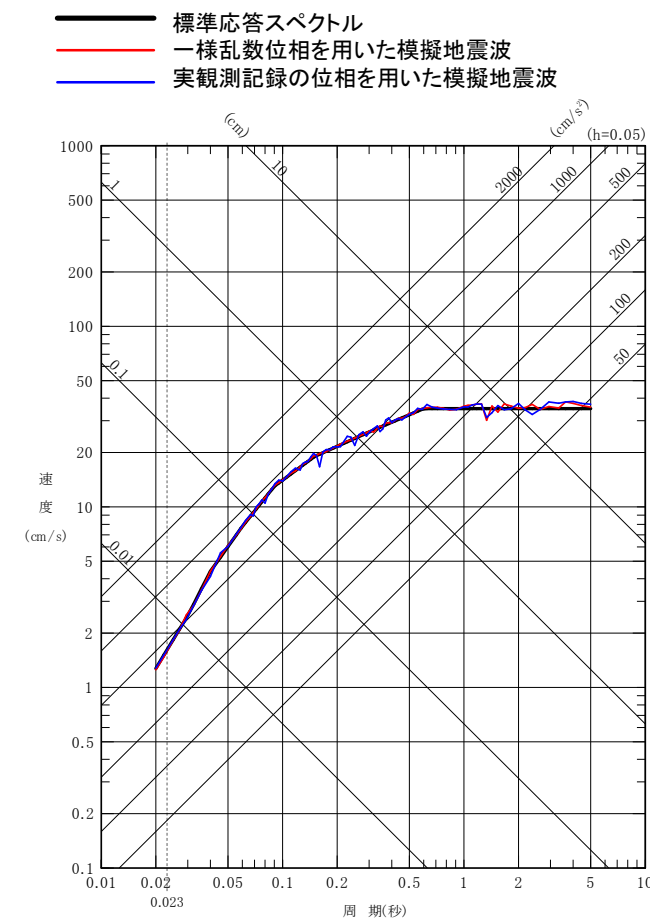
- 地震基盤面における一様乱数位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波を応答スペクトルにて比較する。
- 地震基盤面における両者の応答スペクトルに差異はない。



NS方向



EW方向



UD方向

地震基盤面における模擬地震波の応答スペクトル
(金属キャスク固有周期:0.08秒(水平, 1次), 0.023秒(鉛直, 2次))

3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

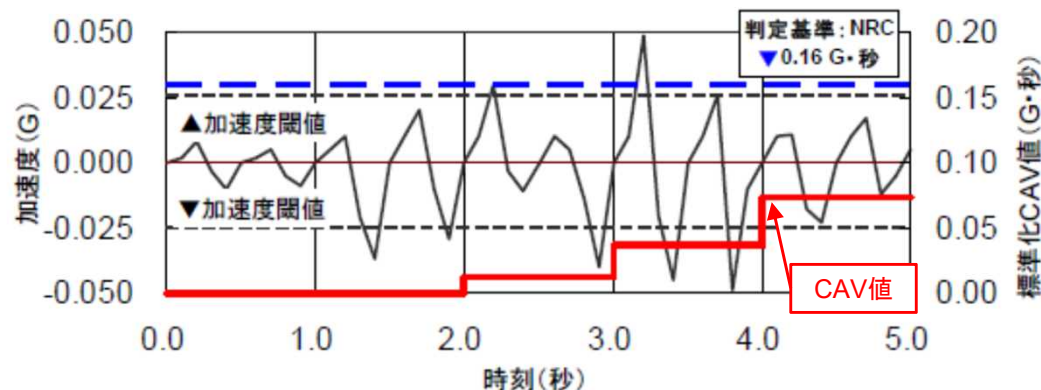
累積絶対速度(CAV値)

■ 累積絶対速度(CAV値)

- CAV値は、米国EPRI(電力中央研究所)が、地震の揺れの強さを計る指標の一つとして、設備の損傷にほとんど影響しないと考えられるパルス的な加速度振幅による不要な炉停止を回避する目的で開発された。
- 米国では岩盤露頭の観測記録を地震後に確認し、プラントの地震後停止を判断する補助指標として運用されており、立地地域の地震動特性を分析し、CAV値とプラント設備の損傷との関係を求め、敷地の適切な加速度閾値と炉停止判断基準を設けている。
- CAV値(標準化CAV値)自体は、加速度時刻歴の時々刻々の変化を1秒区間毎に確認し、その区間内の最大値がある閾値(NRC:0.025G≒24.5Gal)を超過した場合にそのCAVi値[=(1秒区間内の加速度振幅の絶対値×時間刻み)の和、単位:G・秒]を累積していくもの。

$$CAV = CAV_i + \int_i^{i+1} ABS[a(t)]dt$$

- 米国NRCによれば、この標準化CAV値が0.16G・秒を超過するとプラント停止の判断手順に入ることとなっている。
- 本検討では、閾値を0.025G(≒24.5Gal)とし、検討を実施。



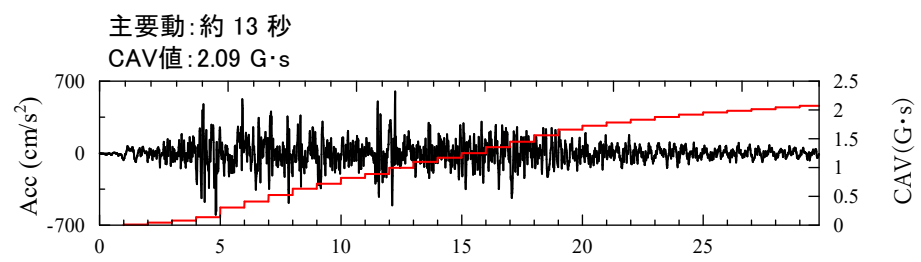
水谷ほか(2008)に
一部加筆

標準化CAV値の概念模式図

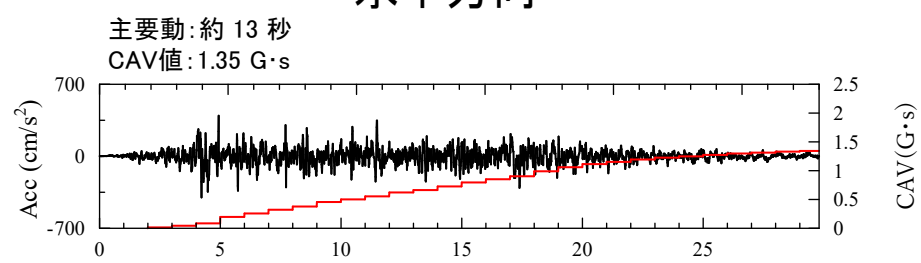
3. 地震基盤面における模擬地震波の検討

累積絶対速度(CAV値)による比較

■ 地震基盤における一様乱数位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波を累積絶対速度(CAV値)にて比較する。



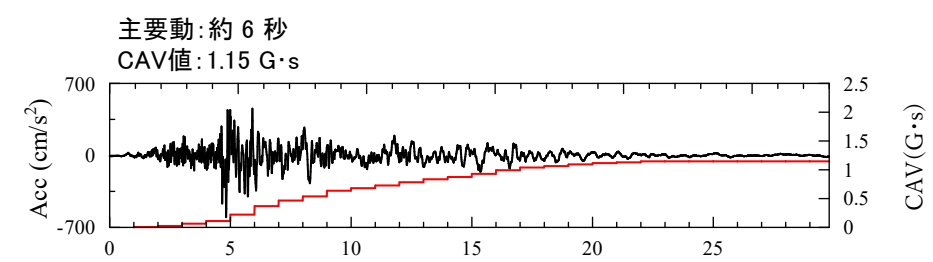
水平方向



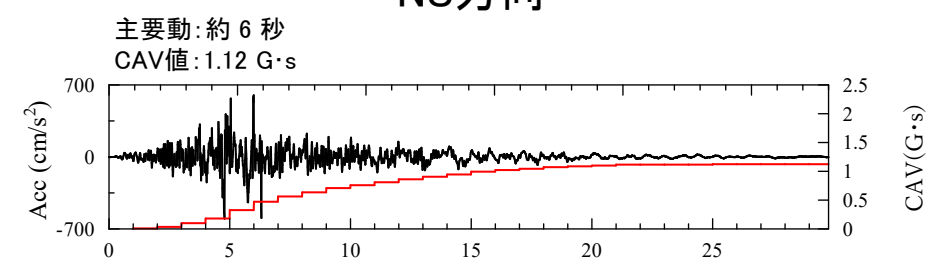
鉛直方向

一様乱数位相を用いた模擬地震波

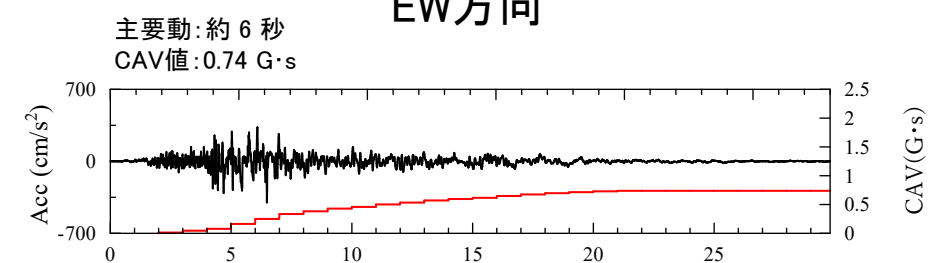
■ 実観測記録の位相を用いた模擬地震波より一様乱数位相を用いた模擬地震波の方が、主要動の継続時間が長く、CAV値が大きくなることを確認した。



NS方向



EW方向



UD方向

実観測記録の位相を用いた模擬地震波

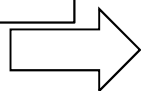
4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討 地震基盤波の入力位置

- 地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) である標高 -1700m の位置に標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を入力し、解放基盤表面 (標高 -218m) における模擬地震波を作成する。

統計的グリーン関数法に用いる地盤モデル

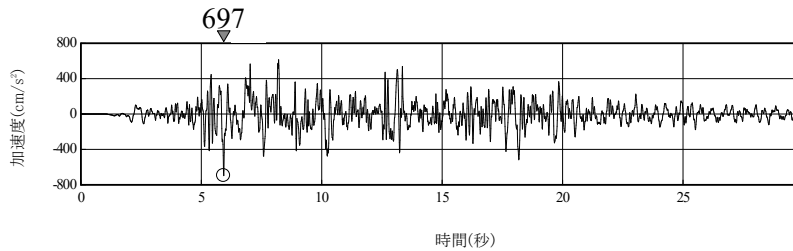
標高 T. P. (m)	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	減衰 (%)	備考
-218	82	2.00	910	2197	1.00	解放基盤表面
-300	180	2.10	990	2510		
-480	1220	2.20	1450	2820		
-1700	∞	2.60	3150	5660	—	地震基盤面

地震基盤波
入力位置

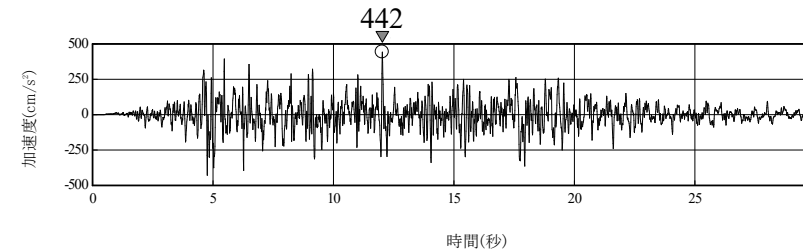


4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討 一様乱数位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) に標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を入力し、一様乱数位相を用いた解放基盤表面における模擬地震波を作成した。

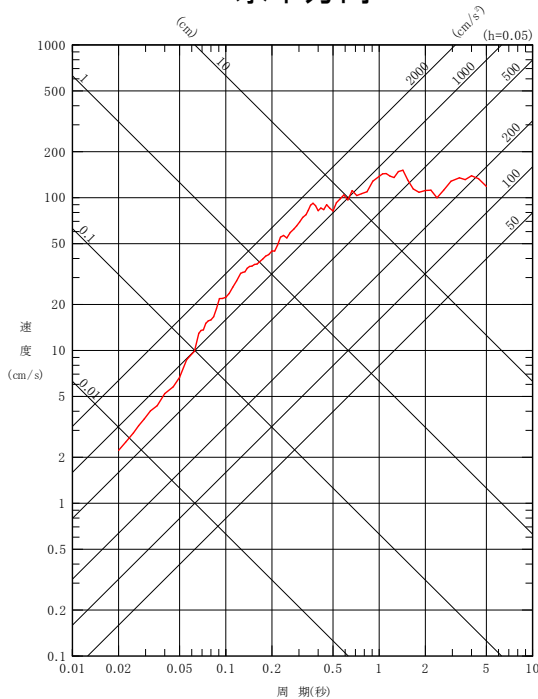


水平方向

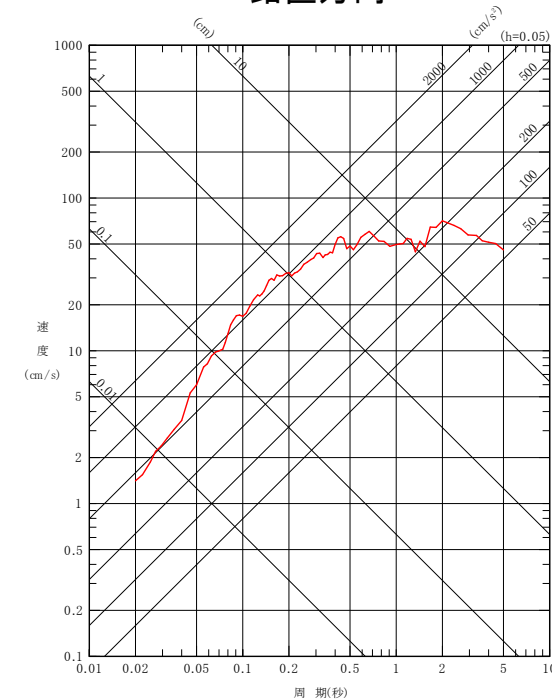


鉛直方向

加速度時刻歴波形



水平方向



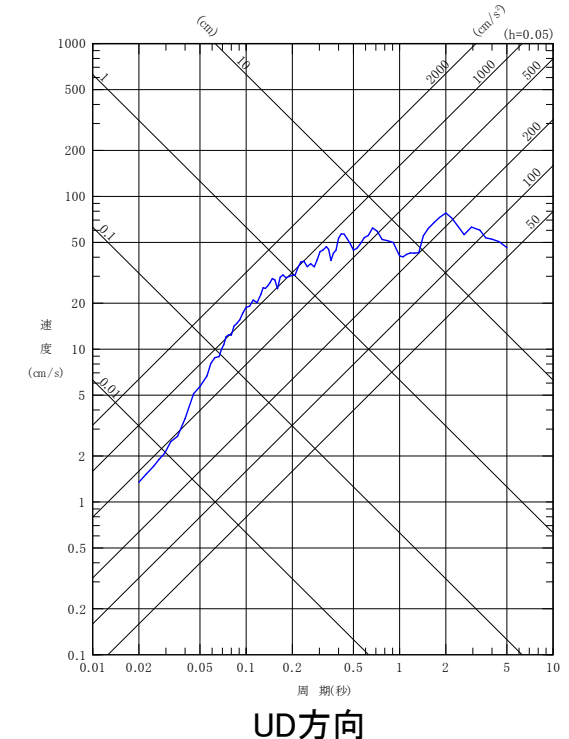
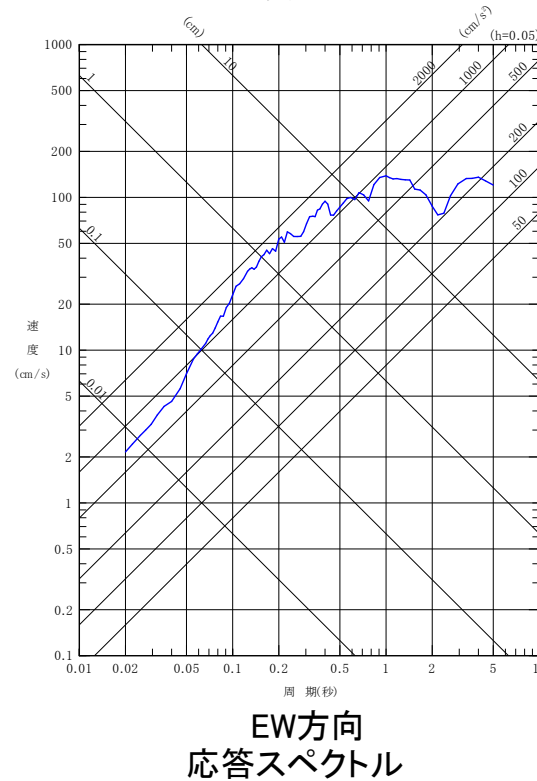
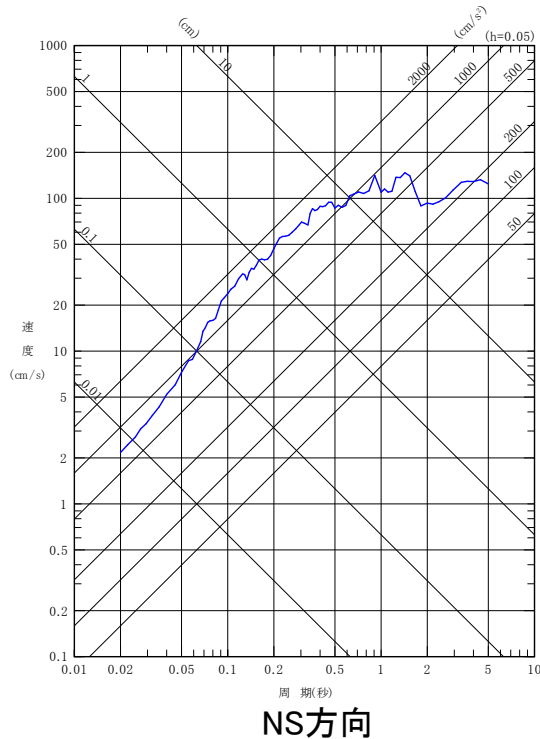
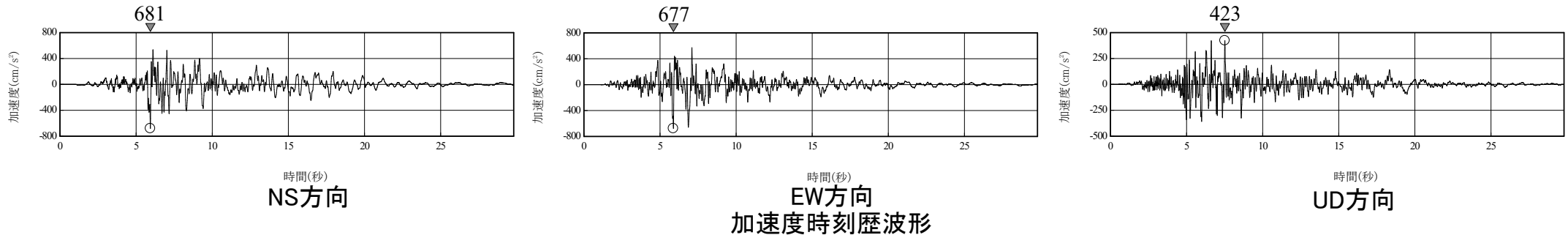
鉛直方向

応答スペクトル

一様乱数位相を用いた模擬地震波

4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討 実観観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤面 ($V_s=3150\text{m/s}$) に標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を入力し、実観測記録の位相を用いた解放基盤表面における模擬地震波を作成した。

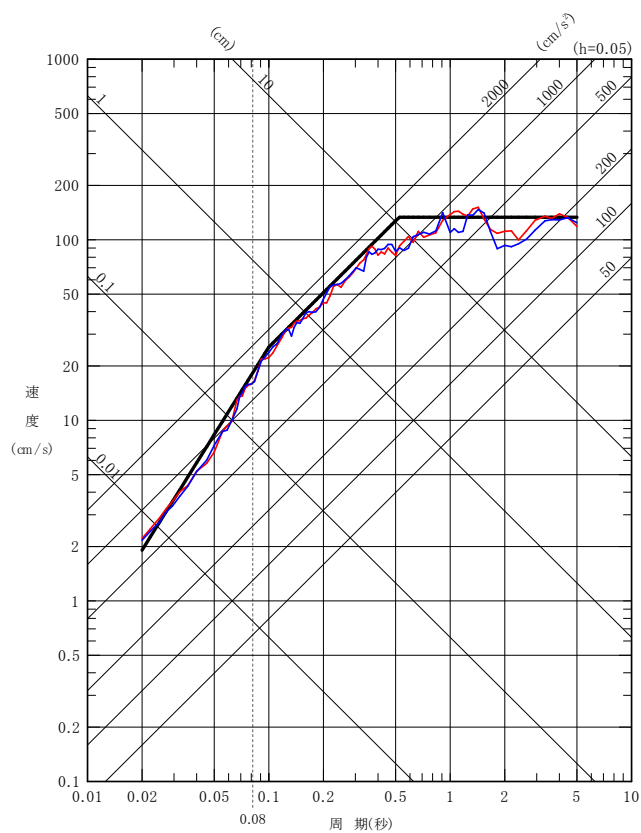


実観観測記録の位相を用いた模擬地震波

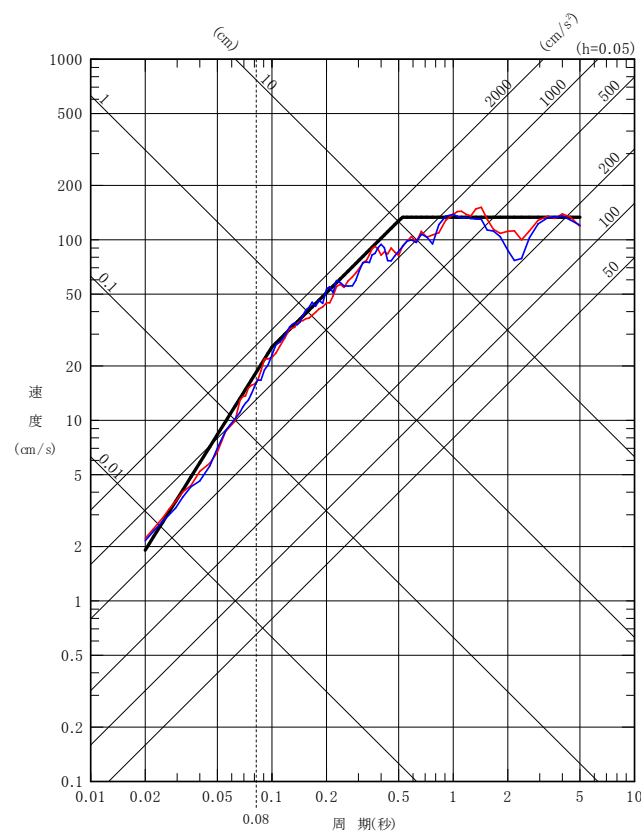
4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討

解放基盤表面における模擬地震波の応答スペクトルの比較

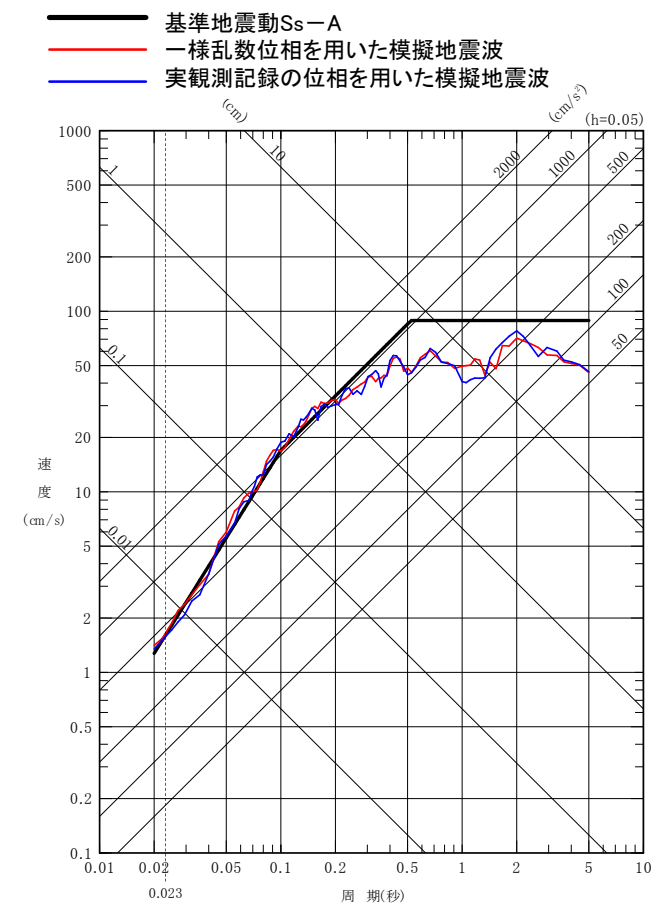
- 解放基盤表面における一様乱数位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波を応答スペクトルにて比較する。
- 解放基盤表面における両者の応答スペクトルに差異はない。



NS方向



EW方向



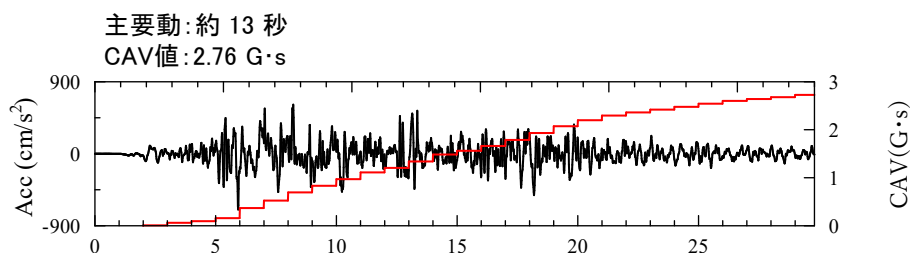
UD方向

解放基盤表面における模擬地震波の応答スペクトル

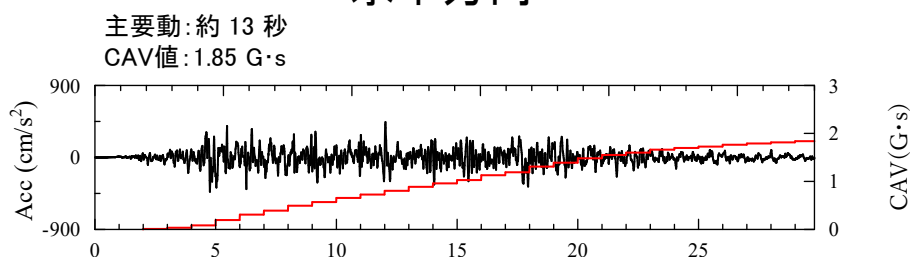
(金属キャスク固有周期:0.08秒(水平, 1次), 0.023秒(鉛直, 2次))

4. 解放基盤表面における模擬地震波の検討 累積絶対速度(CAV値)による比較

- 解放基盤表面における一様乱数位相を用いた模擬地震波と実観測記録の位相を用いた模擬地震波を累積絶対速度(CAV値)にて比較する。



水平方向

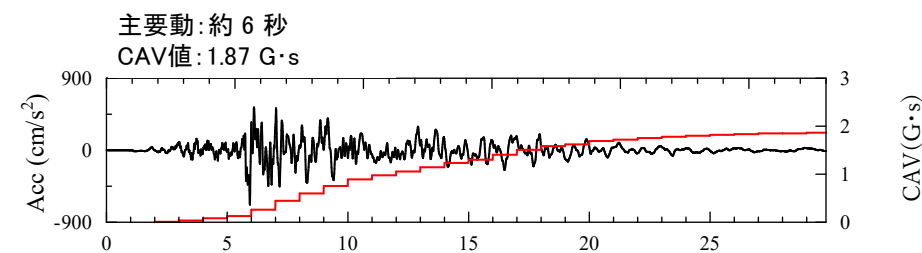


鉛直方向

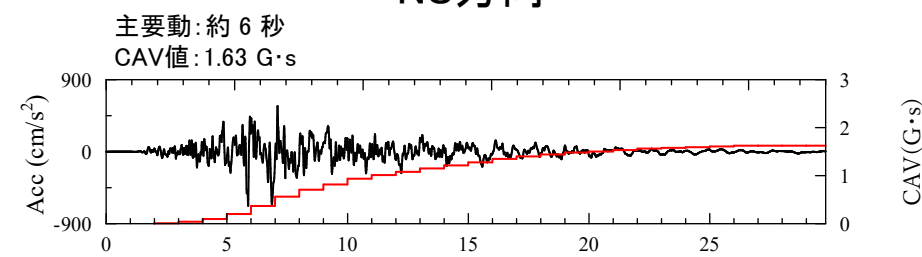
一様乱数位相を用いた模擬地震波

- 実観測記録の位相を用いた模擬地震波より一様乱数位相を用いた模擬地震波の方が、主要動の継続時間が長く、CAV値が大きくなることを確認した。

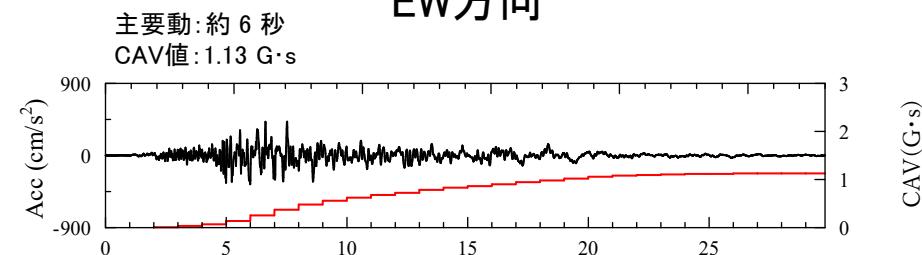
➤ 一様乱数位相を用いた模擬地震波を代表模擬地震波として採用する。



NS方向



EW方向



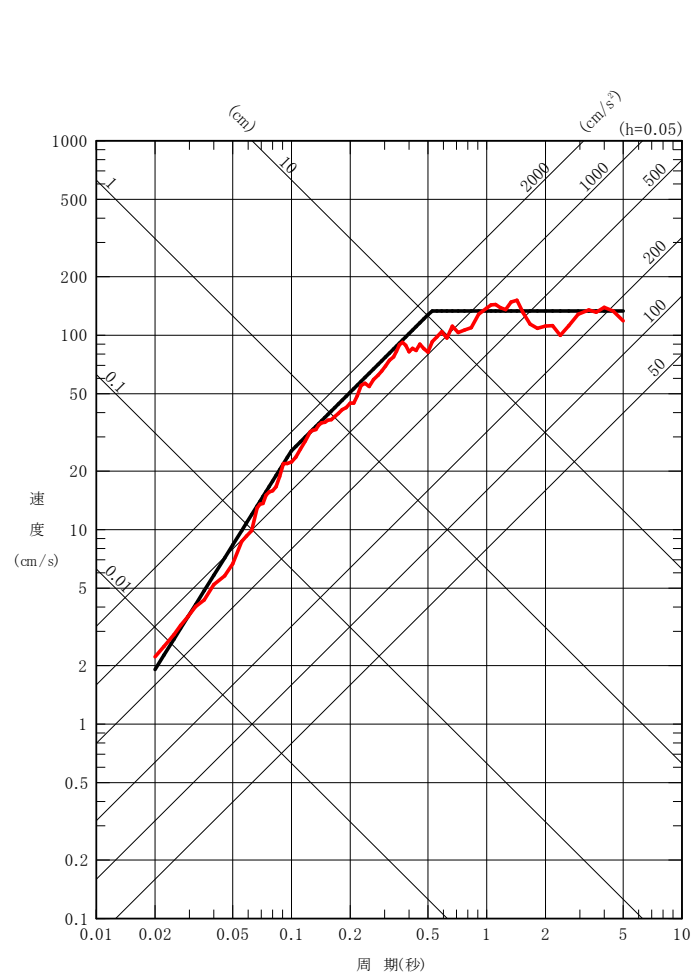
UD方向

実観測記録の位相を用いた模擬地震波

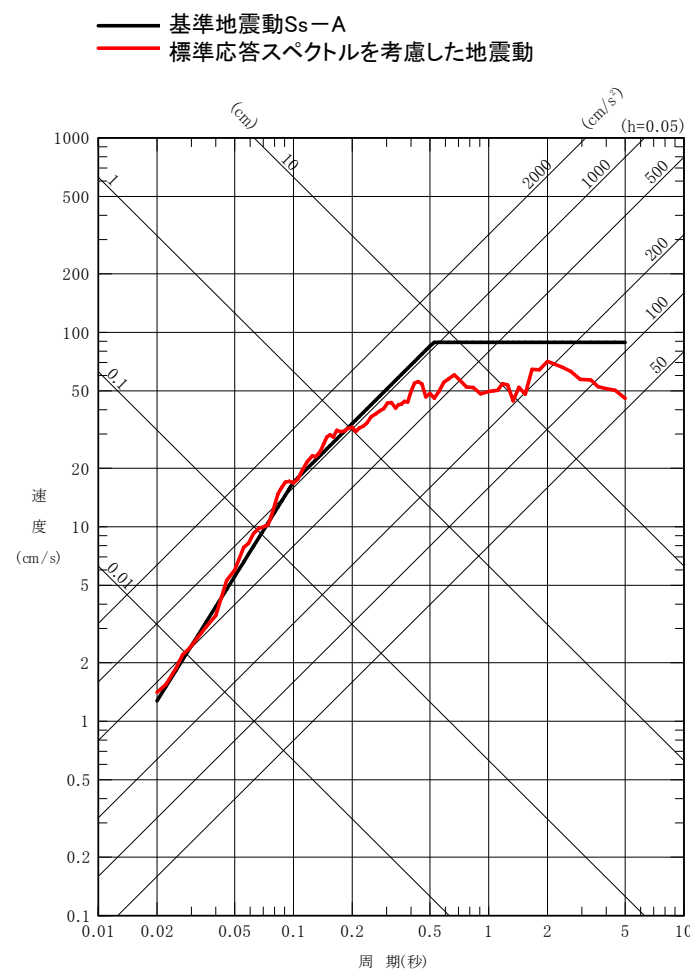
5. 基準地震動の策定

標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動の比較

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯において、基準地震動S_s-A(敷地ごとに震源を特定して策定する地震動に基づく基準地震動)を上回るため、新たに基準地震動として追加した。



水平方向



鉛直方向

標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動S_s-Aの比較

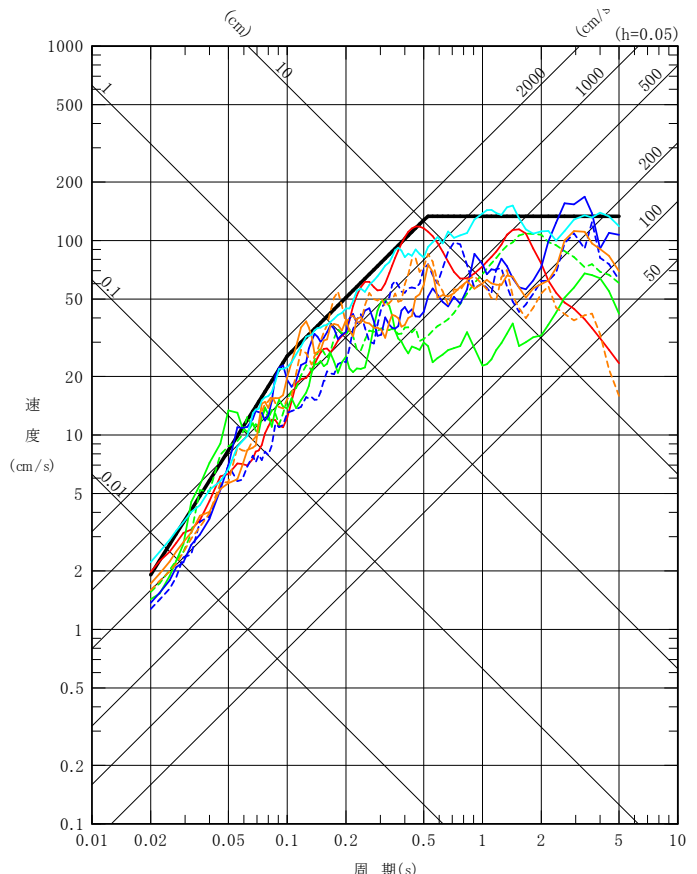
5. 基準地震動の策定

基準地震動の応答スペクトル

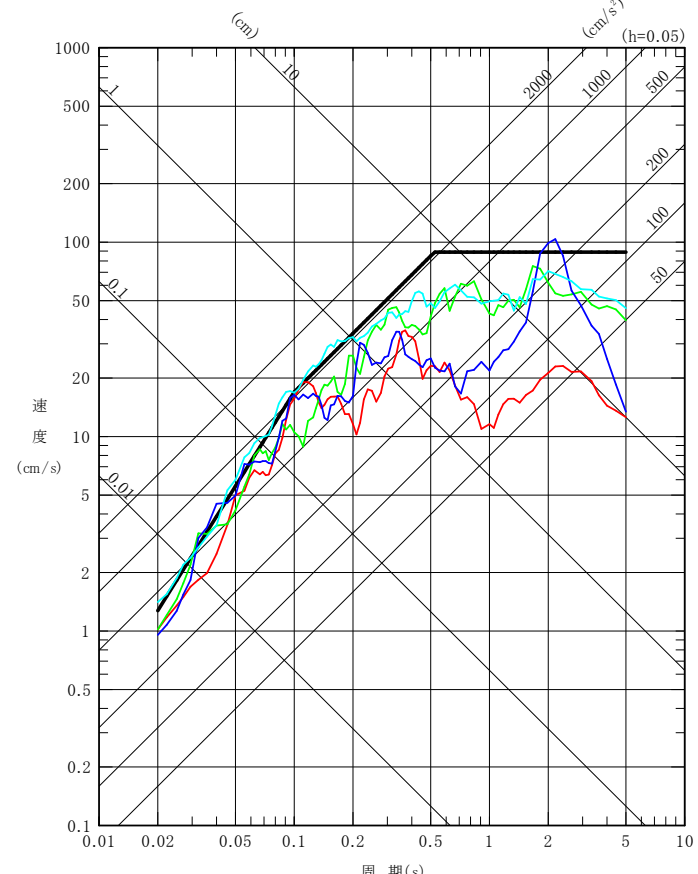
■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動S_s-B5とし、既許可の全ての基準地震動と合わせて以下に示す。

- : 基準地震動S_s-A
- : 基準地震動S_s-B1 2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) 水平方向
- : 基準地震動S_s-B2 2008年岩手宮城内陸地震 (栗駒ダム[右岸地山]) 水平方向 1
- - - : 基準地震動S_s-B2 2008年岩手宮城内陸地震 (栗駒ダム[右岸地山]) 水平方向 2
- : 基準地震動S_s-B3 2008年岩手宮城内陸地震 (KiK-net金ヶ崎) 水平方向 1
- - - : 基準地震動S_s-B3 2008年岩手宮城内陸地震 (KiK-net金ヶ崎) 水平方向 2
- : 基準地震動S_s-B4 2008年岩手宮城内陸地震 (KiK-net-関東) 水平方向 1
- - - : 基準地震動S_s-B4 2008年岩手宮城内陸地震 (KiK-net-関東) 水平方向 2
- : 基準地震動S_s-B5 標準応答スペクトルを考慮した地震動

- : 基準地震動S_s-A
- : 基準地震動S_s-B1 2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) 鉛直方向
- : 基準地震動S_s-B2 2008年岩手宮城内陸地震 (栗駒ダム[右岸地山]) 鉛直方向
- : 基準地震動S_s-B3 2008年岩手宮城内陸地震 (KiK-net金ヶ崎) 鉛直方向
- : 基準地震動S_s-B5 標準応答スペクトルを考慮した地震動



水平方向



鉛直方向

基準地震動の応答スペクトル

5. 基準地震動の策定

基準地震動の一覧

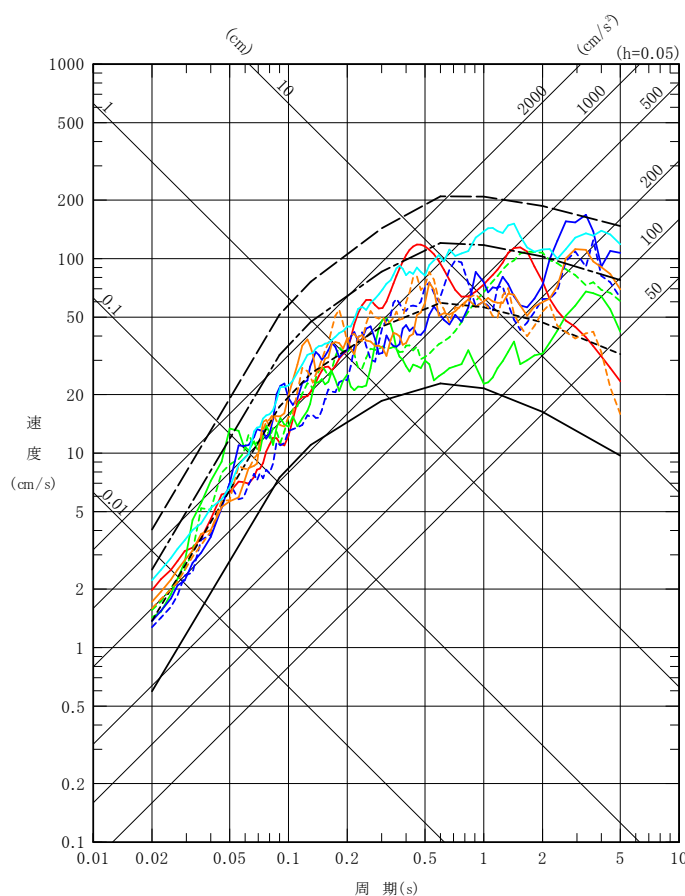
■ 基準地震動の一覧を示す。

基準地震動		最大加速度 (cm/s ²)		
		水平方向1	水平方向2	鉛直方向
Ss-A	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動に基づく基準地震動	<p>600</p>	<p>600</p>	<p>400</p>
Ss-B1	2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町)	<p>620</p>	<p>620</p>	<p>320</p>
Ss-B2	2008年岩手・宮城内陸地震 (栗駒ダム右岸地山)	<p>450</p>	<p>490</p>	<p>320</p>
Ss-B3	2008年岩手・宮城内陸地震 (KiK-net金ヶ崎)	<p>430</p>	<p>400</p>	<p>300</p>
Ss-B4	2008年岩手・宮城内陸地震 (KiK-net一関東)	<p>540</p>	<p>500</p>	—
Ss-B5	標準応答スペクトルを考慮した地震動	<p>697</p>	<p>697</p>	<p>442</p>

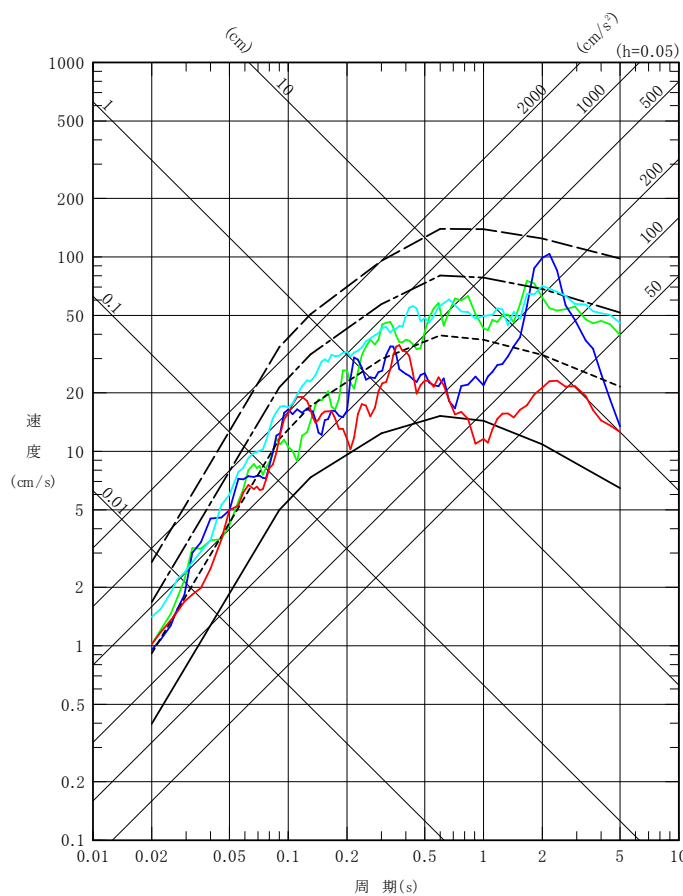
5. 基準地震動の策定

領域震源(領域8B)の一様ハザードスペクトルと基準地震動Ss-B1~B5の比較

- 敷地が位置する領域震源(領域8B)の一様ハザードスペクトルと、震源を特定せず策定する地震動に基づき策定している基準地震動Ss-B1~B5をあわせて示す。
- 領域震源(領域8B)の一様ハザードスペクトルとの比較によれば、基準地震動Ss-B1~B5の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度である。

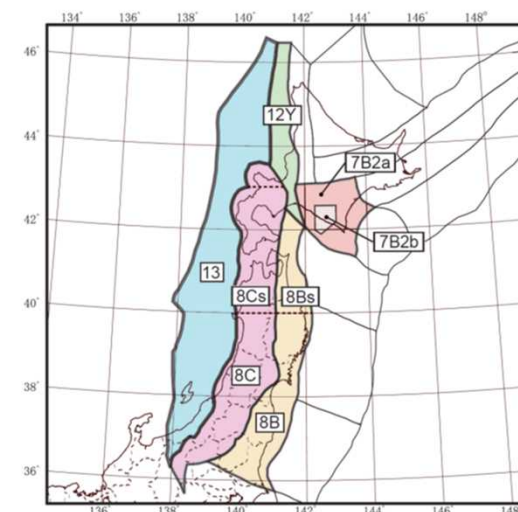


水平方向



鉛直方向

一様ハザードスペクトル(領域震源(領域8B))と基準地震動Ss-B1~B5の比較



内陸地殻内地震の評価で考慮する領域
(領域8B、8Cは、北緯 $40^{\circ} \sim 43^{\circ}$ の範囲に限定した小領域(8Bs、8Cs)を考慮した分岐を設ける)

- : 基準地震動Ss-B1
- : 基準地震動Ss-B2
- : 基準地震動Ss-B3
- : 基準地震動Ss-B4
- : 基準地震動Ss-B5
- - - : 一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-3})
- - - : 一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-4})
- - - : 一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-5})
- - - : 一様ハザードスペクトル (年超過確率 10^{-6})

※ 鉛直方向の一様ハザードスペクトルは、水平方向の評価結果に対し、基準地震動Ss-Aの水平方向と鉛直方向の比率を考慮して設定している。

参考文献

- 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(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」に関する検討報告書、令和元年8月7日
- Noda, S., K.Yashiro, K.Takahashi, M.Takemura, S.Ohno, M.Tohdo and T.Watanabe (2002) :RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, Oct.16-18, Istanbul
- 一般社団法人日本電気協会(2015) :原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015
- 水谷浩之、西村 功、敦賀隆史、萩原 実、柏崎琢也、真下 貢(2008) :平成19年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の観測記録に基づく揺れの強さの指標の比較(最大加速度振幅, SI値及び累積速度CAV値) 、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2008年9月、1015-1016.