

東通原子力発電所1号炉審査資料	
資料番号	A1-CA-0125
提出年月日	2023年7月20日

東通原子力発電所
震源を特定せず策定する地震動の評価について
(全国共通に考慮すべき地震動)
(コメント回答)

2023年7月20日
東北電力株式会社

審査会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	今回ご説明資料の掲載箇所
S227	2023年5月19日 第1147回審査会合	標準応答スペクトルに基づく地震動評価のうち、地震基盤相当面の設定において、 V_p やSI値を設定根拠として最深部にすることは基準規則解釈上適切ではないため、再検討すること。なお、検討に当たっては、最浅部からの入力には短周期側で大きい傾向が認められることについても留意すること。	p.3, 46, 47, 48, 52, 53, 56, 57, 67, 68

基準地震動の策定全体フローと本資料の説明範囲

敷地周辺の地震発生状況

- ・ 被害地震
- ・ 敷地周辺で発生したM5.0以上の地震
- ・ 敷地周辺で発生したM5.0以下の地震
- ・ 震源として考慮する活断層

敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

- ・ 地質調査, 観測記録等による敷地地盤の振動特性の検討
- ・ 経験的グリーン関数法に用いる地下構造モデル(はぎとり地下構造モデル)の設定
- ・ 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定
- ・ 理論的手法に用いる地下構造モデルの設定

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

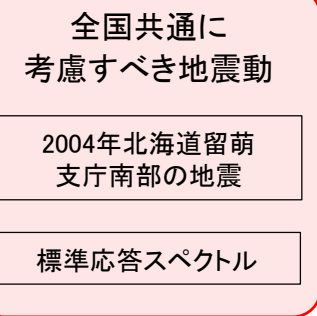
①検討用地震の選定, 断層モデルの設定



②地震動評価



震源を特定せず策定する地震動



基準地震動の策定

「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」の評価結果を踏まえて策定

基準地震動の超過確率の参照

特定震源モデル及び領域震源モデルに基づき地震ハザード評価を実施

凡例 : 本資料の説明箇所 : 説明済の箇所 : 今後の説明箇所

申請時(①2014年6月申請, ②2021年12月補正)以降の審議等を踏まえた反映事項

S227

①2014年6月申請内容	審議等を踏まえた反映事項
<ul style="list-style-type: none"> 加藤ほか(2004)による応答スペクトルに Noda et al.(2002)の方法により求めた地盤増幅特性を考慮して、震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトルを設定した。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 「全国共通に考慮すべき地震動」について検討・評価を行った。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2004年北海道留萌支庁南部の地震における防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動について、佐藤ほか(2013)による評価を踏まえた地震動を評価した。 ✓ 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 別記2」(2021年4月改正)に示されている「標準応答スペクトル」を踏まえた地震動を評価した。(2021年12月に提出した設置変更許可申請書の一部補正の内容を一部修正。) <p>なお、地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$以上)で定義された標準応答スペクトルは、$V_s=2200\text{m/s}$、$V_p=4200\text{m/s}$における加藤ほか(2004)による応答スペクトルを上回っていることから、加藤ほか(2004)による応答スペクトルは採用しない。[参考資料(本資料 p.59)参照]</p>

②2021年12月補正内容	審議等を踏まえた反映事項
<ul style="list-style-type: none"> 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波は、一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成し、その振幅包絡線の経時的変化は、Noda et al.(2002)の方法により評価し、マグニチュード6.9、等価震源距離10kmとした。 標準応答スペクトルに基づく地震動評価の地震基盤相当面としては、地下構造モデルの最深部[T.P.-2987.8m ($V_s=3340\text{m/s}$、$V_p=5800\text{m/s}$層上面)]とし、模擬地震波を入力し解放基盤表面までの地盤補正を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する標準応答スペクトルに適合する模擬地震波について、その振幅包絡線の経時的変化の評価に用いるマグニチュードを7.0に見直した。 ➢ 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波は、複数の方法で作成することが望ましいが、敷地において適切な観測記録が得られていないこと等から、一様乱数の位相特性を用いた方法により作成した。 ➢ 標準応答スペクトルに基づく地震動評価の地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$以上)の要件には地下構造モデルのT.P.-282.8m以深の層が該当するが、この該当層の中から東通の地下構造モデルの特徴を踏まえ模擬地震波の入力位置は、2箇所(T.P.-282.8m、T.P.-2987.8m)を選定した。

目次

1. 検討方針	.....	5
2. 2004年北海道留萌支庁南部の地震における基盤地震動の知見を用いた評価	.....	8
2.1 2004年北海道留萌支庁南部の地震の概要	.....	9
2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動	.....	12
2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討	.....	19
2.4 震源を特定せず策定する地震動に考慮する地震動	.....	39
3. 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価	.....	41
3.1 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価概要	.....	42
3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価	.....	44
3.3 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価	.....	49
3.4 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果	.....	52
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価結果	.....	54
参考資料	.....	58
参考文献	.....	70

1. 検討方針

1. 検討方針

(1) 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイドを踏まえた評価方針

基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイドの記載	評価方針
<ul style="list-style-type: none"> • 「全国共通に考慮すべき地震動」の検討対象地震の選定においては、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」が適切に選定されていることを確認する。 • 「全国共通に考慮すべき地震動」については、設置許可基準規則解釈別記2第4条第5項第3号②に掲げる知見を用いて解放基盤表面における応答スペクトル(地震動レベル)が設定されていること。 <div style="border: 1px dashed black; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p>【設置許可基準規則解釈別記2 第4条第5項第3号②】</p> <p>②上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動 • 震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面(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で、せん断波速度$V_s=2200\text{m/s}$以上の地層をいう。)における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。)として次の図に示すもの </div>	<ul style="list-style-type: none"> • 2004年北海道留萌支庁南部の地震について、佐藤ほか(2013)による評価を踏まえた地震動を評価する。 • 標準応答スペクトルに対し、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地盤増幅率を考慮した地震動を評価する。

1. 検討方針

(2) 全国共通に考慮すべき地震動の評価フロー

全国共通に考慮すべき地震動の評価

2004年北海道留萌支庁南部の地震における
基盤地震動の知見を用いた評価
(2章にて詳細説明)

2004年北海道留萌支庁南部の地震に
関する知見

佐藤ほか(2013)による基盤地震動

佐藤ほか(2013)以降の追加検討

震源を特定せず策定する地震動に
考慮する地震動

標準応答スペクトルに基づく地震動の評価
(3章にて詳細説明)

標準応答スペクトル

模擬地震波の作成
(地震基盤相当面)

解放基盤表面位置における応答評価

全国共通に考慮すべき地震動の評価結果
(4章にて詳細説明)

2. 2004年北海道留萌支庁南部の地震における 基盤地震動の知見を用いた評価

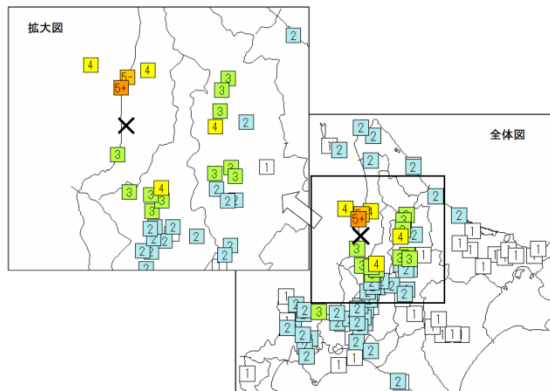
- 2. 1 2004年北海道留萌支庁南部の地震の概要
- 2. 2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
- 2. 3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
- 2. 4 震源を特定せず策定する地震動に考慮する地震動

2.1 2004年北海道留萌支庁南部の地震の概要 (1)地震の概要

■概要(発生日時, 地震規模等)

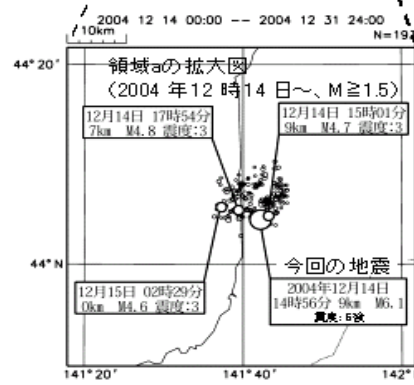
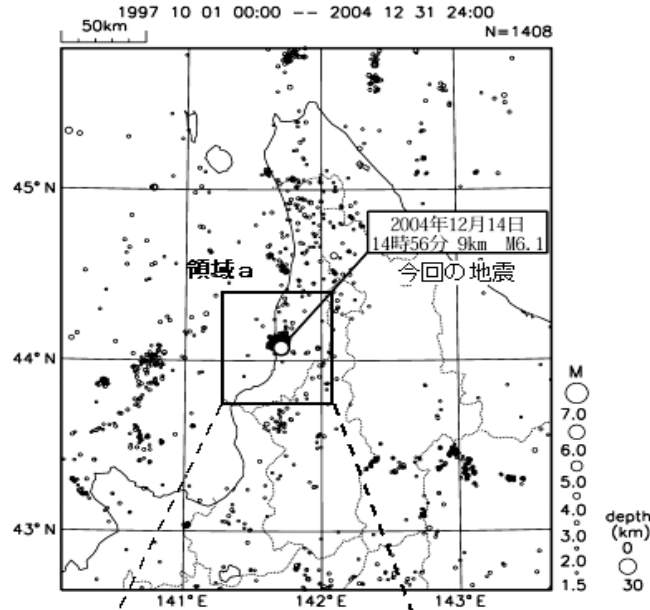
発生日時	2004/12/14 14:56
震央地名	留萌地方南部
緯度	44° 04.6' N
経度	141° 41.9' E
深さ	9km
規模	M6.1(Mw5.7)
震度	観測点名
5強	苫前町旭(旧)
5弱	羽幌町南3条
4	秩父別町役場(旧) 剣淵町仲町(旧) 羽幌町焼尻 初山別村有明

(気象庁震度データベースによる)



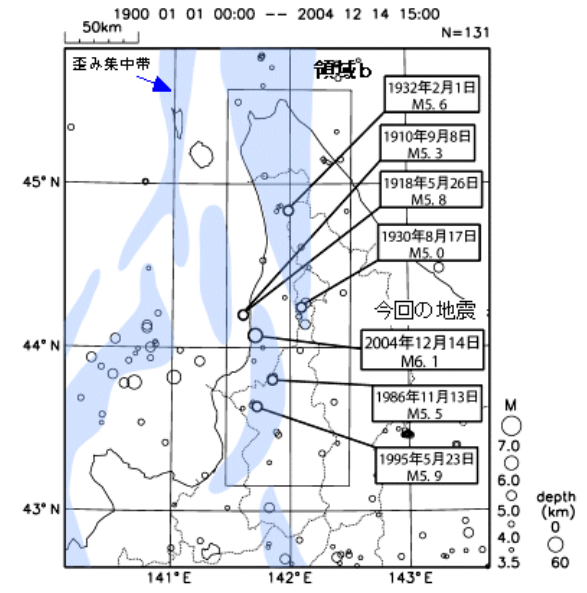
震度分布〔気象庁報道発表資料(2004.12.14)〕

■震央分布図(1997年10月~, M≥1.5)



〔気象庁報道発表資料(2005.1.11)〕

■震央分布図(1900年~, M≥3.5)



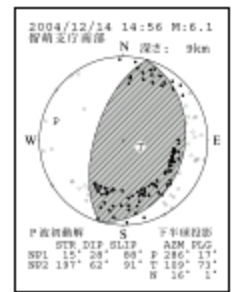
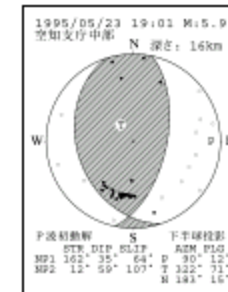
※ 震央分布図に表記した歪み集中帯のデータは、「日本海東縁の活断層と地震テクトニクス」(東京大学出版会,2002)を使用した。

〔気象庁報道発表資料(2005.1.11)〕

■発震機構(P波初動解)

1995年5月23日の地震

今回の地震



〔地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2005.1.12)〕

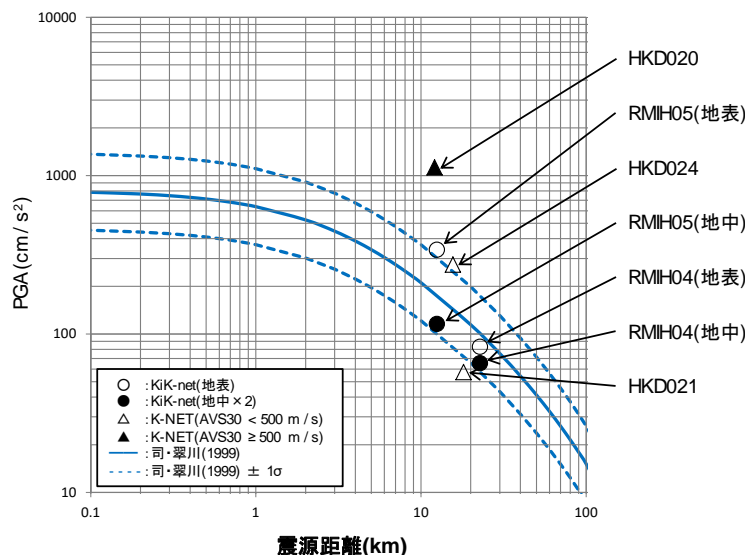
2.1 2004年北海道留萌支庁南部の地震の概要 (2) 観測記録(K-NET, KiK-net)

- 震央距離が30km以内の観測記録としては下表の5記録になる。
- このうち、震源近傍に位置するHKD020(港町)においては、最大加速度 1127.2cm/s^2 が観測されており、司・翠川(1999)の距離減衰式の $+1\sigma$ を上回る。

K-NET及びKiK-netの最大加速度

観測点			震源距離 (km)	AVS30 (m/s)	Amax(cm/s ²)		
					NS	EW	UD
K-NET (地表)	HKD020	港町	12.1	562.7	535.7	1127.2	368.4
	HKD024	達布	15.6	337.2	184.9	274.0	73.5
	HKD021	留萌	18.1	302.0	57.5	44.6	20.0
KiK-net (地表・地中)	RMIH05	小平西	12.5	218.1	340.4 (57.8)	236.1 (36.8)	66.2 (27.4)
	RMIH04	小平東	22.8	543.3	83.0 (23.8)	81.8 (32.7)	36.5 (25.9)

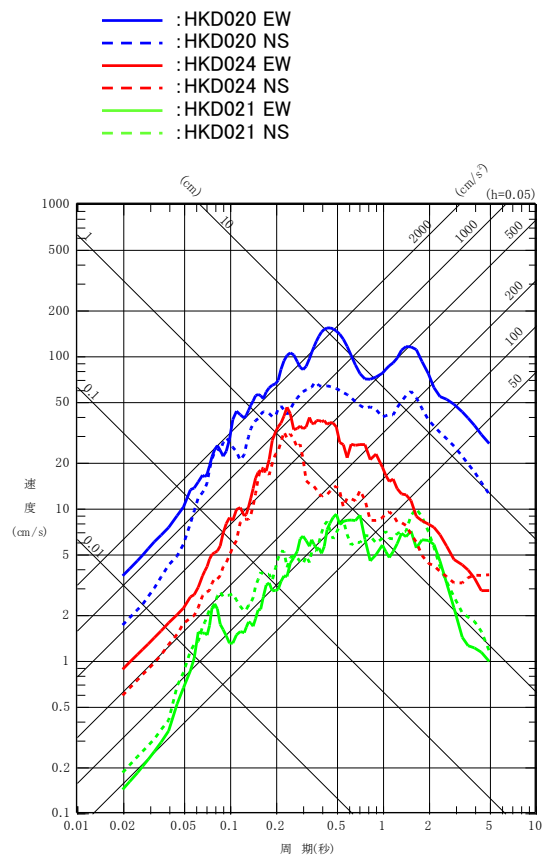
※()内は地中観測記録



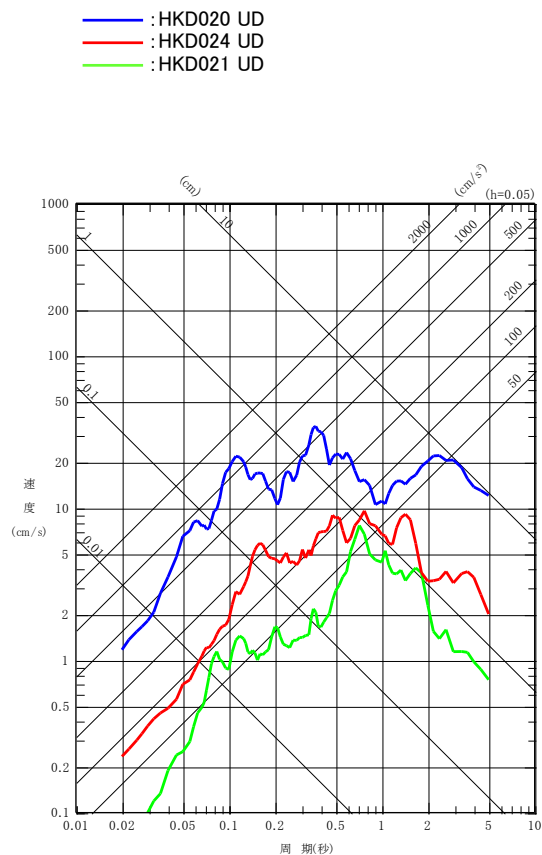
司・翠川(1999)の距離減衰式との関係

2. 1 2004年北海道留萌支庁南部の地震の概要 (3) 観測記録(K-NET)

- K-NET観測点の観測記録のうち、HKD020(港町)のEW成分及びUD成分の観測記録は、その他震源付近の観測点のHKD021(留萌)及びHKD024(達布)の観測記録を上回る。
- 佐藤ほか(2013)では、物理探査及び室内試験に基づくHKD020(港町)の基盤地震動の評価を行っていることから、その知見を踏まえ「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動の評価を行う。



水平方向



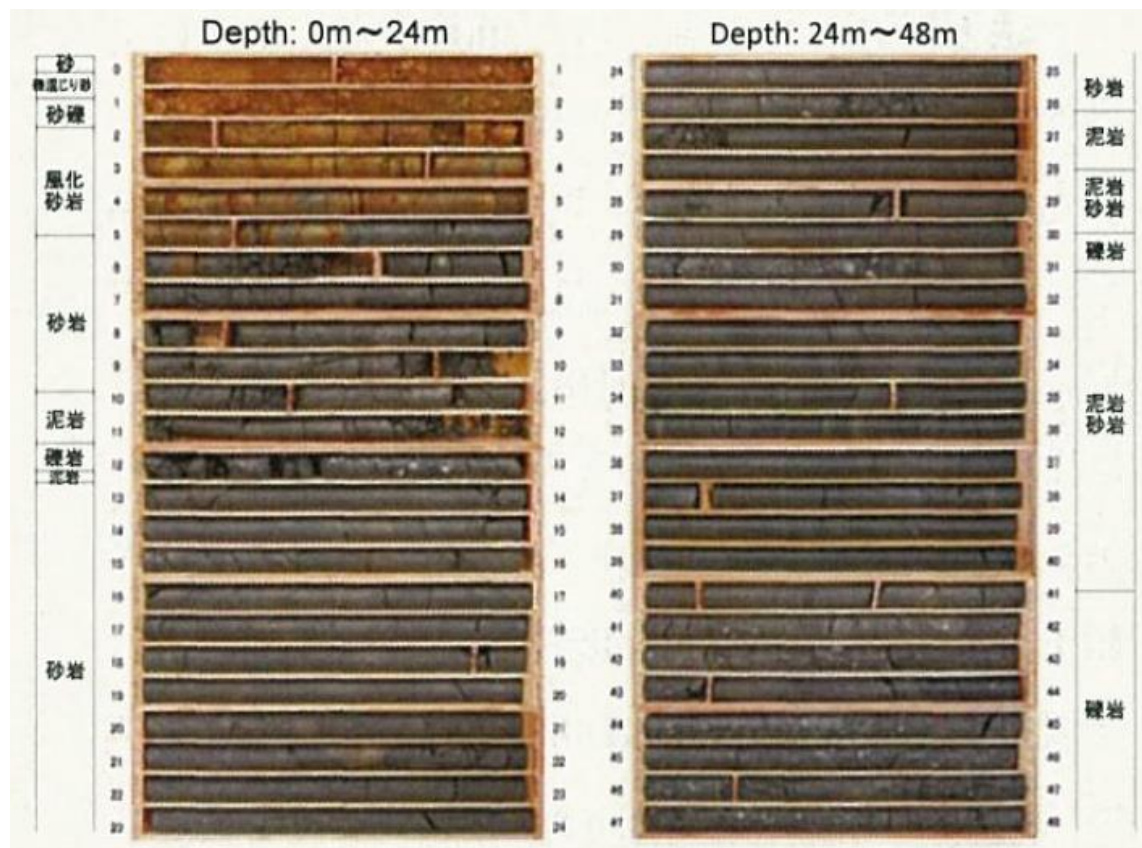
鉛直方向

K-NET各観測記録の応答スペクトル

2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(1)HKD020観測点の物理探査 ①ボーリングコア

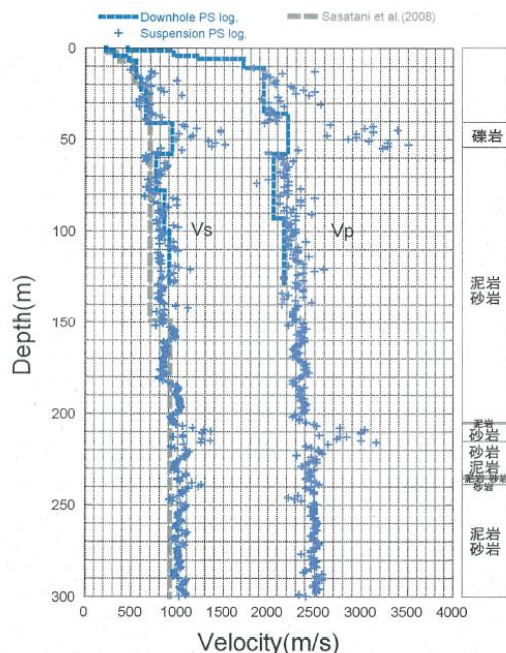
- HKD020(港町)の地質構造・速度構造の把握を目的として、地震計設置地点から北西約5mの同一標高位置で、深さ300m(G.L.-300m)までのボーリング掘削をオールコア採取で実施している。
- G.L.-13m付近までの岩盤は亀裂が多く、岩盤が脆いことを示唆している。また、それ以深の岩盤層については、泥岩・砂岩の互層が主体で、そのうちG.L.-30m付近、さらにG.L.-41m以深に礫岩層が存在する構成となっている。



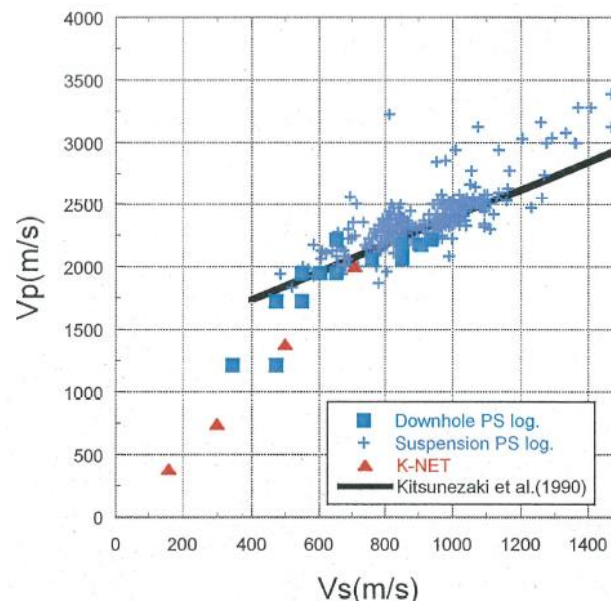
HKD020(港町)におけるボーリングコア写真
(左:深さ0m~24m, 右:深さ24m~48m)

2. 2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (1)HKD020観測点の物理探査 ②PS検層

- ボーリング孔を用いて、G.L.-150mまではダウンホール法とサスペンション法、G.L.-300mまではサスペンション法によるPS検層を実施している。
- G.L.-50m付近までは、笹谷ほか(2008)の微動アレイ探査に基づくS波速度構造と今回の調査によるS波速度構造は十分に対応していない。しかし、G.L.-58m以深の泥岩・砂岩互層が続く部分のS波速度構造については、大局的にサスペンション法によるS波速度構造とほぼ対応している。
- PS検層によるS波速度構造から、 V_s が700m/s以上となる明瞭な速度境界としての基盤層を、 V_s が938m/sとなるG.L.-41mに設定している。また、その深さの V_p が2215m/sであるため、 V_p の観点からみても基盤層の深さは妥当としている。
- 狐崎ほか(1990)による既往の経験式より、 V_s が700m/s以上では、 V_p が2000m/sを超えている。



HKD020(港町)におけるPS検層結果と既往の研究によるS波速度構造モデル

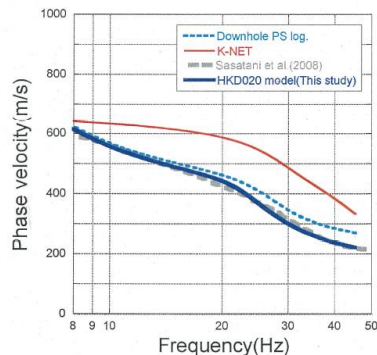


HKD020(港町)のPS検層結果によるVp-Vs関係と既往の経験式の比較

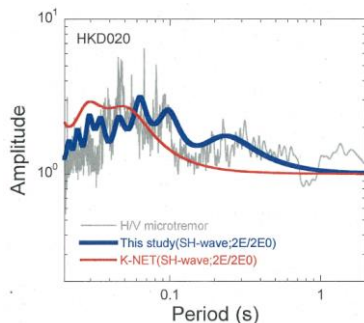
2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(1)HKD020観測点の物理探査 ③地盤モデル

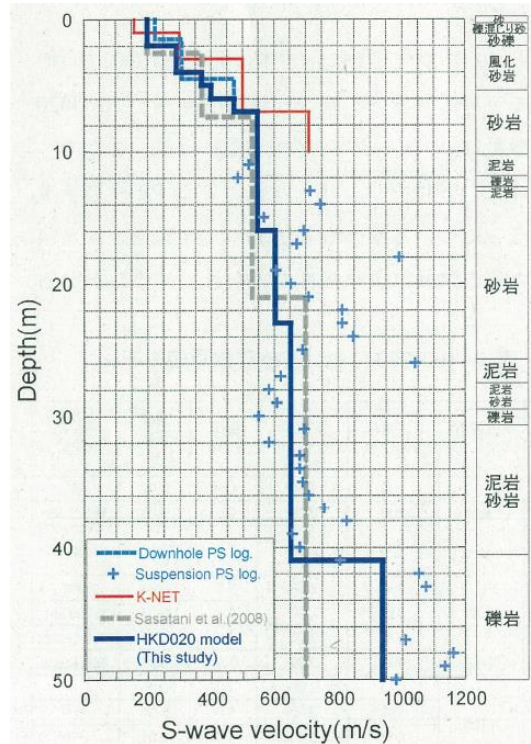
- ダウンホール法によるPS検層結果のVsが500m/s以下のG.L.-6mまでのS波速度を, 笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できるように若干修正し, HKD020(港町)の地盤モデルを作成している。
- HKD020(港町)の地盤モデルによるSH波の理論増幅特性の卓越周期は, 微動H/Vスペクトルの卓越周期と周期0.02秒程度のごく短周期までよく対応している。K-NET地盤情報によるSH波の理論増幅特性は, 微動H/Vスペクトルの卓越を説明できない。
- 以上から, 佐藤ほか(2013)によるHKD020(港町)の地盤モデルは, より妥当なモデルであると結論づけている。



HKD020(港町)におけるレイリー波位相速度の比較



HKD020(港町)における微動H/Vスペクトルと地盤モデルに基づくSH波の理論増幅特性の比較



HKD020(港町)における地盤速度構造(S波速度構造)の比較

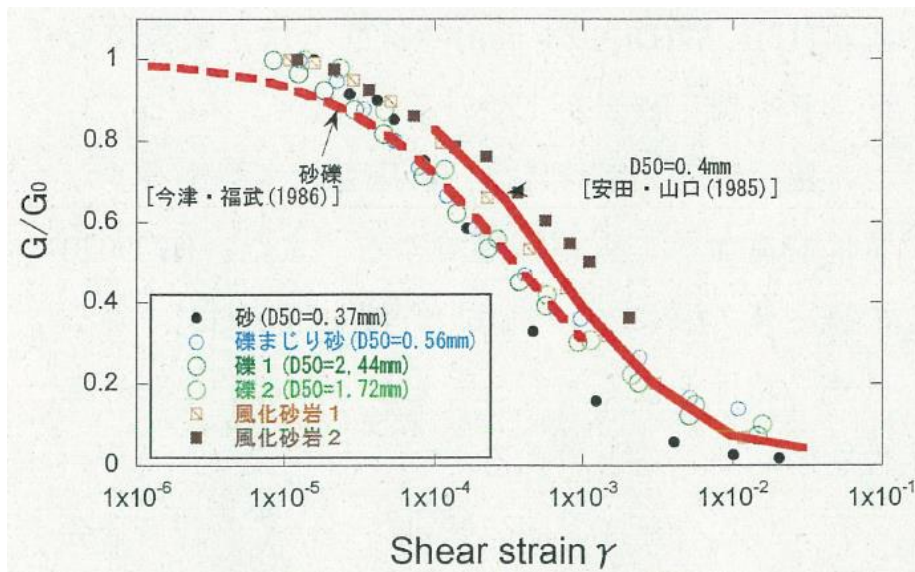
HKD020(港町)における地震動評価モデル

上面深度 (m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1	952	200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5		290	2.00	1.0	0.01	礫2
2			2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
3			2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
4	1722	370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5		400	2.00	1.0	0.01	—
6		473	2.00	1.0	0.01	—
7	2215	549	2.00	9.0	0.01	—
16		604	2.06	7.0	0.01	—
23		653	2.06	18.0	0.01	—
38						
41	938	2.13	—	—	0.01	—

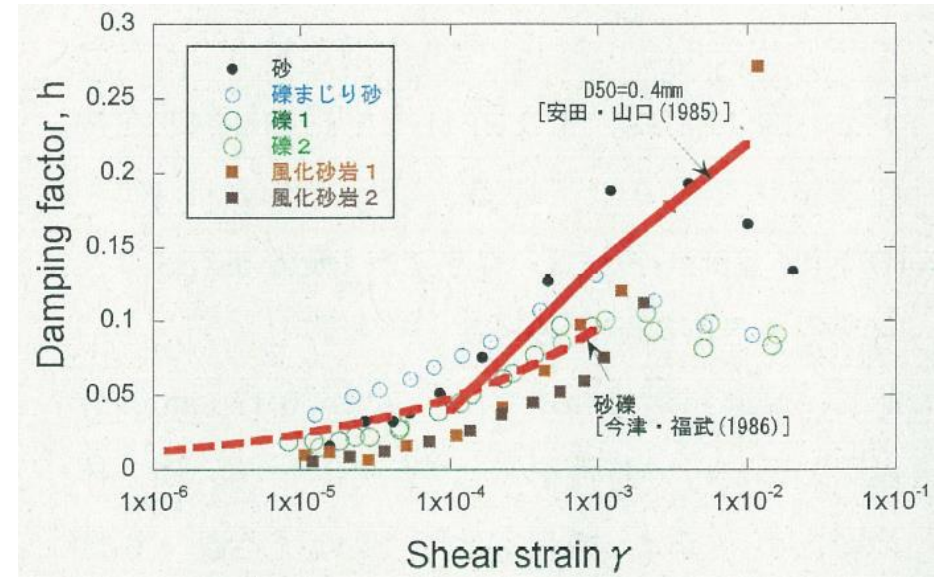
2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(2)HKD020観測点の基盤地震動評価 ①繰返し三軸試験による非線形特性

- G.L.-6mまでの土質地盤の6点について、GPサンプリングにより試料採取し、0.2Hzの正弦波による繰返し三軸試験によって地盤の剛性 G 及び減衰 h のひずみ γ 依存性を取得している。
- ひずみレベル 10^{-4} オーダーで G/G_0 が0.6程度、すなわち初期の剛性から4割程度低下している。
- G/G_0 のひずみ依存性に関する既往の経験式との対応が良い。
- 室内試験を実施した砂、礫混じり砂、礫、風化砂岩に対応するG.L.-6m程度までの地盤は、強震時に非線形性を生じやすい特性であるとしている。



HKD020(港町)における表層地盤の G/G_0 のひずみ γ 依存性と既往の経験式の比較

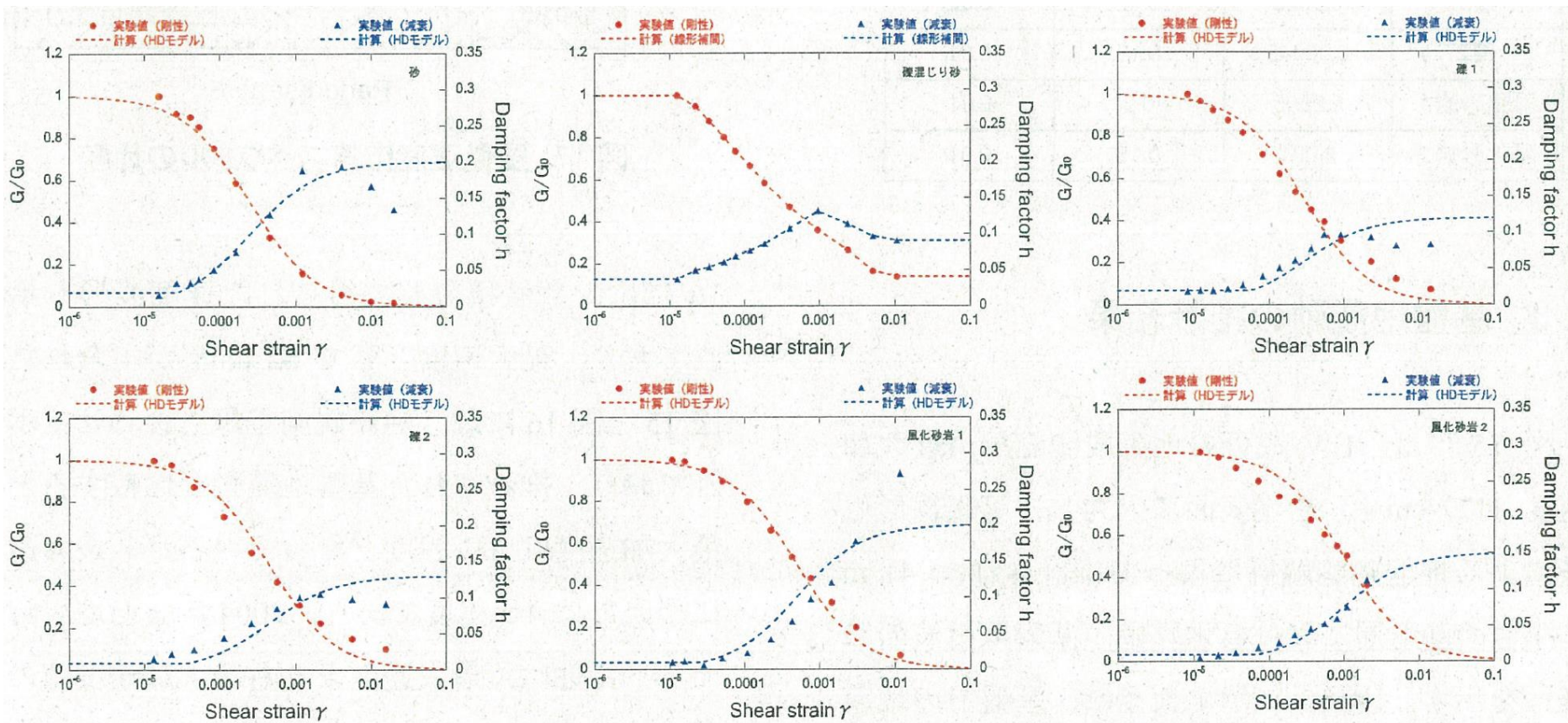


HKD020(港町)における表層地盤の減衰定数 h のひずみ γ 依存性と既往の経験式の比較

2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(2)HKD020観測点の基盤地震動評価 ②地盤モデルの非線形特性

- G.L.-6mまでの層については、室内試験結果を用いてH-Dモデルにより非線形特性($G/G_0 - \gamma$, $h - \gamma$)を設定している。

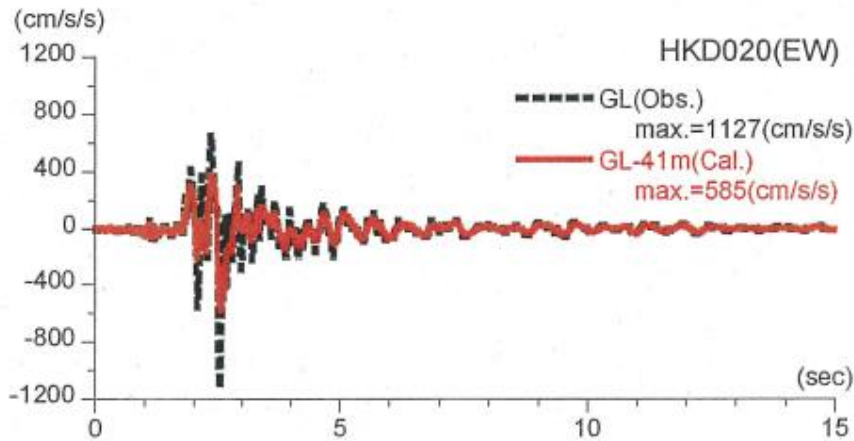


等価線形解析において設定した地盤の非線形特性

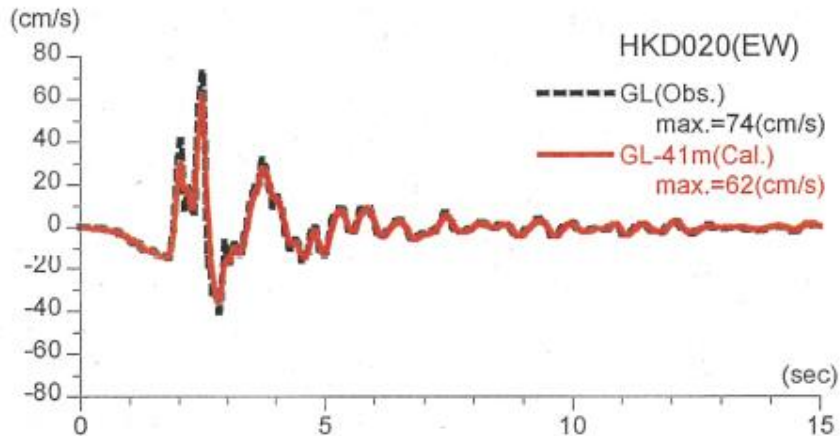
2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(2)HKD020観測点の基盤地震動評価 ③基盤地震動評価(EW成分)

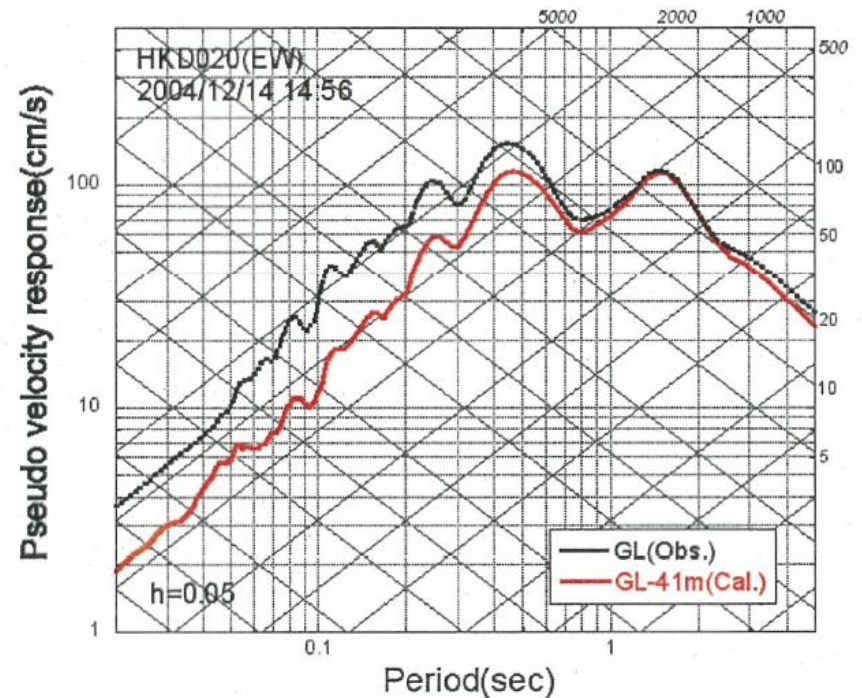
- 等価線形解析により、地表観測記録(EW成分)からG.L.-41mの基盤地震動を評価している。
- はざとり結果の最大加速度は 585cm/s^2 で、地表観測記録の約1/2となっている。



推計された基盤地震動と地表観測記録の比較



速度に変換した基盤地震動と地表観測記録の比較

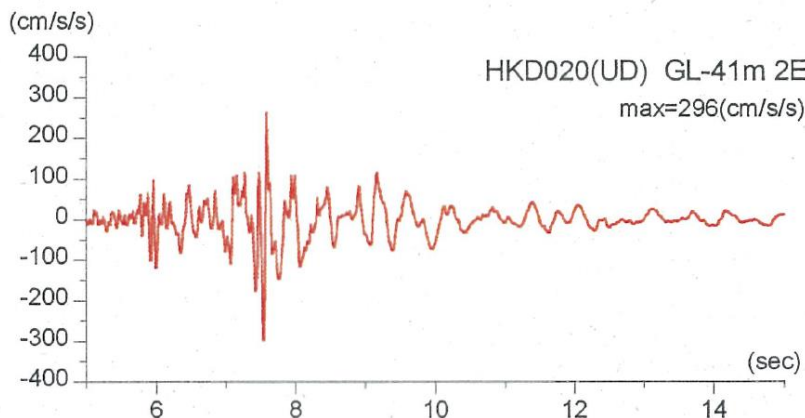


擬似速度応答スペクトルの比較

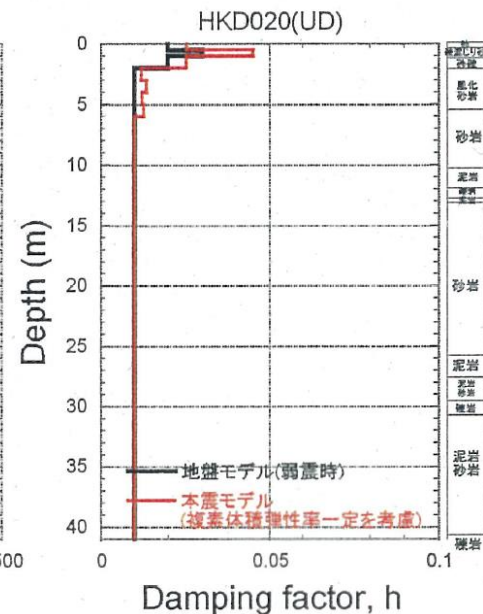
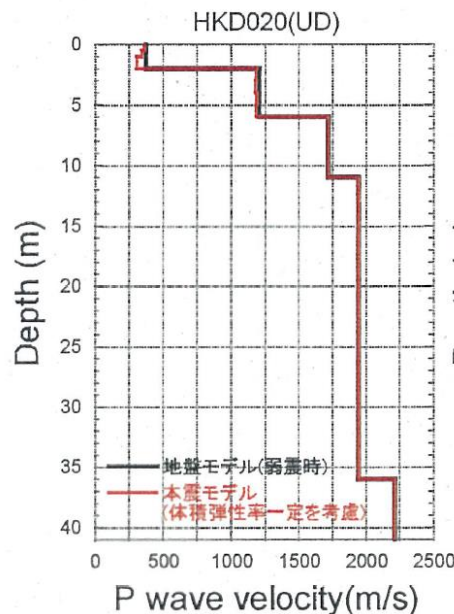
2.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動

(2)HKD020観測点の基盤地震動評価 ④基盤地震動評価(UD成分)

- 体積弾性率一定を仮定した1次元波動論による線形解析により、地表観測記録(UD成分)からG.L.-41mの基盤地震動を評価している。
- はぎとり結果の最大加速度は296cm/s²となっている。



推定された基盤地震動



2004年北海道留萌支庁南部の地震時のP波速度と減衰定数

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

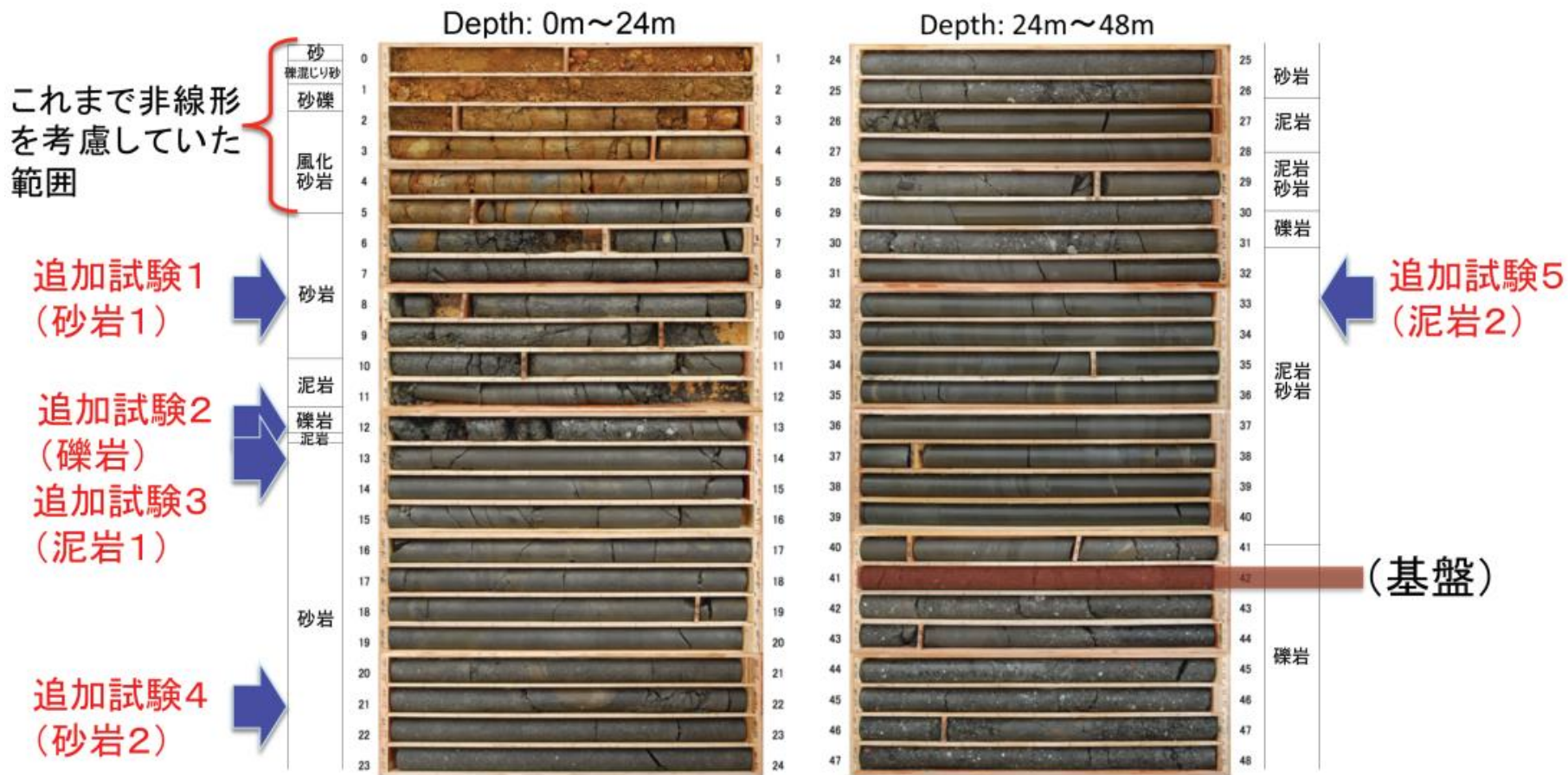
(1) 追加検討内容

- 佐藤ほか(2013)では、K-NET観測点のHKD020(港町)について、G.L.-6m以浅に室内試験結果を考慮した非線形解析を行い、G.L.-41mの基盤面における基盤地震動を評価している(G.L.-6m以深は線形解析を仮定、減衰定数は1%に設定)。
- 上記の基盤地震動の評価結果について妥当性を確認するため、以下の追加検討を実施する。
 - ① 佐藤ほか(2013)の報告時点以降に得られた、G.L.-6mからG.L.-41mまでの室内試験結果を用い、G.L.-41m以浅に非線形性を考慮して基盤地震動(水平方向)を評価。
 - ② 不確かさを考慮した基盤地震動の評価として、G.L.-6m以浅は非線形、G.L.-6m以深は減衰定数を3%として基盤地震動(水平方向)を評価。
 - ③ 佐藤ほか(2013)の報告時点以降に得られた、PS検層の再測定結果から、地盤モデルを変更して基盤地震動(鉛直方向)を評価〔解析方法は佐藤ほか(2013)と同様〕。
 - ④ HKD020(港町)における地下水位の状況を踏まえ、G.L.-6m以浅はポアソン比一定、G.L.-6m以深は体積弾性率一定として基盤地震動(鉛直方向)を評価。

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) a. 室内試験

➤ G.L.-6mからG.L.-41mまでの5ヶ所において、室内試験を実施した。

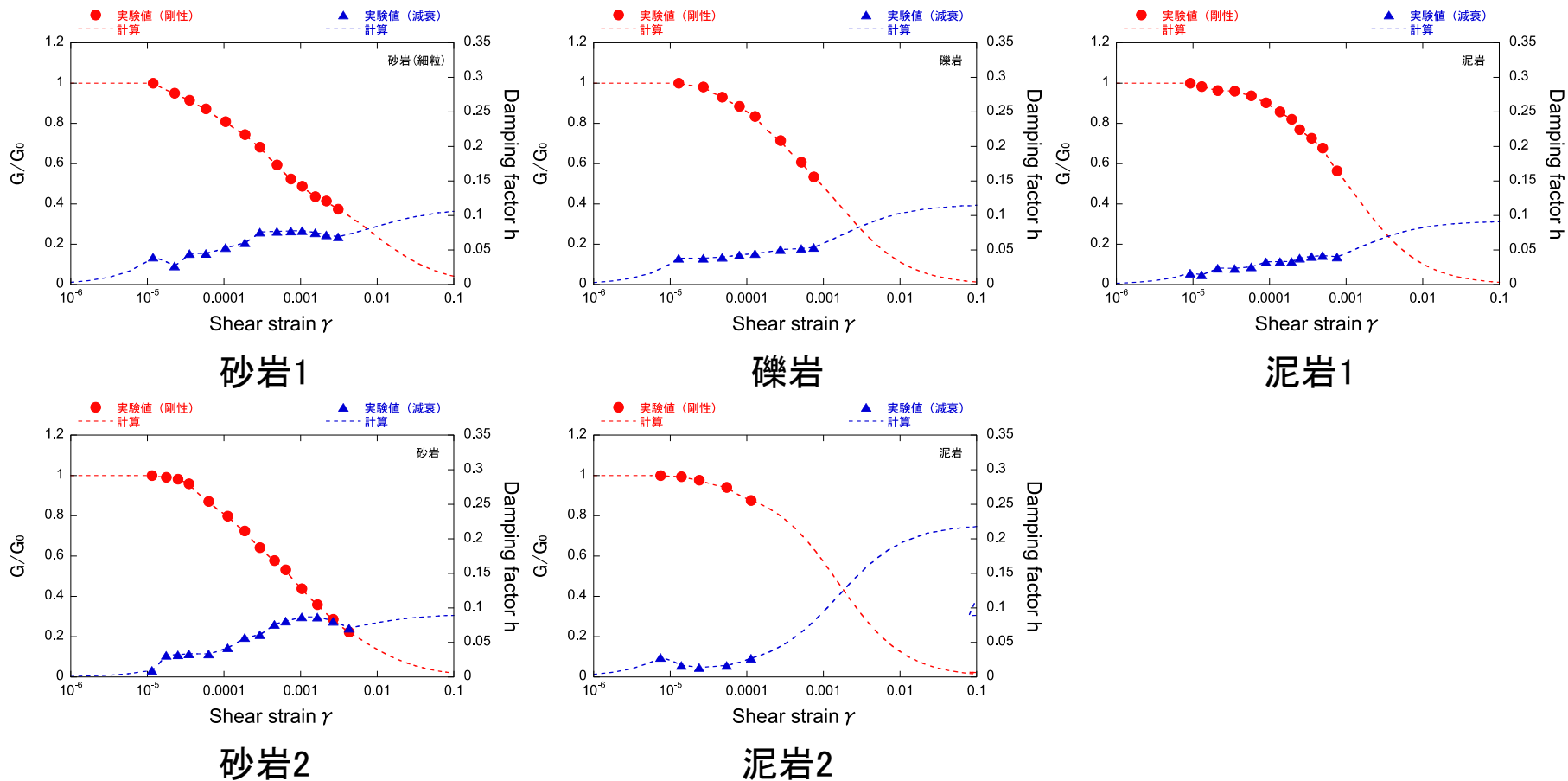


追加の室内試験の実施位置

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2)追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) b. 非線形性の設定

➤ 追加の室内試験結果により非線形性を設定した。

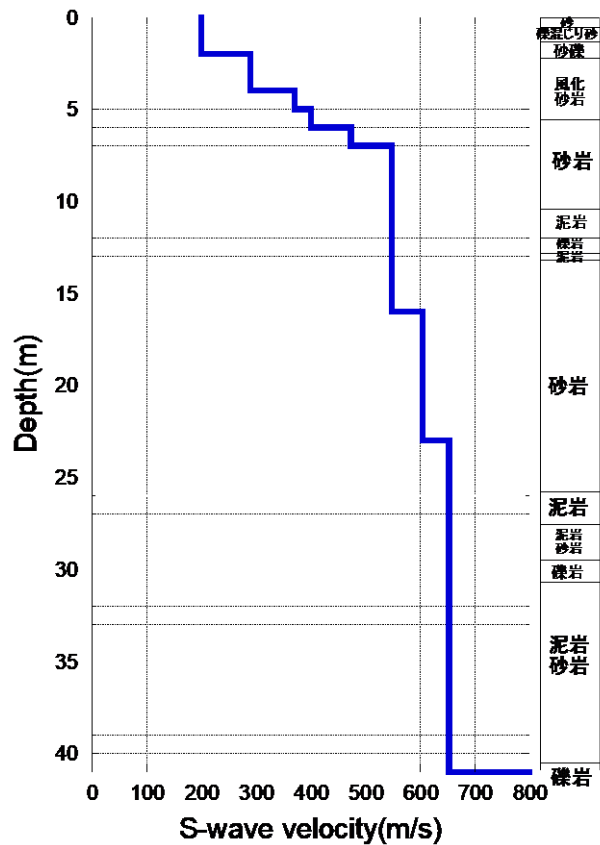


追加の室内試験による地盤の非線形特性

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) c. 地盤モデル

- G.L.-6mからG.L.-41mまでの地盤の非線形特性と減衰定数を変動させて、等価線形解析によりG.L.-41mでの基盤地震動を評価した。



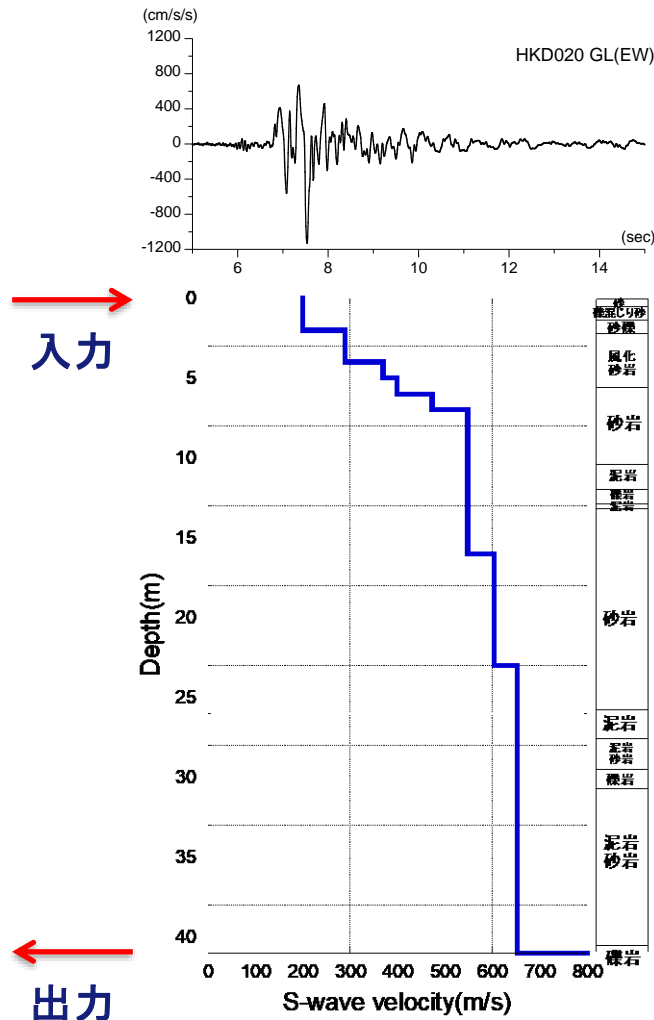
S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (1000kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数h (初期値)	非線形特性
200	1.9	0.5	0.02	砂
200	2.0	0.5	0.03	礫混じり砂
200	2.0	1	0.02	礫1
290	2.0	1	0.01	礫2
290	2.0	1	0.01	風化砂岩1
370	2.0	1	0.01	風化砂岩2
400	2.0	1	0.02	砂岩1
473	2.0	1	0.02	砂岩1
549	2.0	3	0.02	砂岩1
549	2.0	2	0.01	泥岩1
549	2.0	1	0.03	礫岩
549	2.0	0.5	0.01	泥岩1
549	2.0	2.5	0.01	砂岩2
604	2.06	7	0.01	砂岩2
653	2.06	18	0.015	泥岩2
938	2.13	17	0.01	—

等価線形解析に用いる地盤モデル

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) d. 解析条件

- ▶ 地表観測記録を入力として, G.L.-41mまで非線形性を考慮した等価線形解析から, G.L.-41m($V_s=938\text{m/s}$)における基盤地震動を評価した。



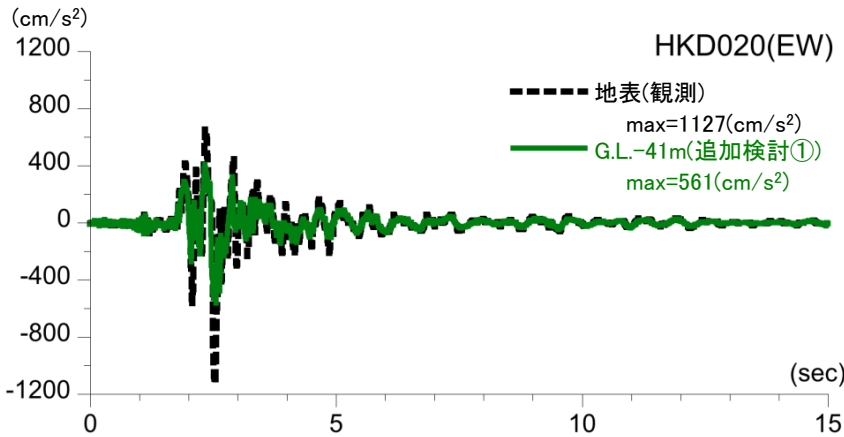
等価線形解析の条件

- ✓ 有効ひずみ $\gamma_{\text{eff}} = 0.65 \gamma_{\text{max}}$
- ✓ 収束判定値(前のモデルとの差異): 1%以内
- ✓ 最大繰り返し計算回数: 30回

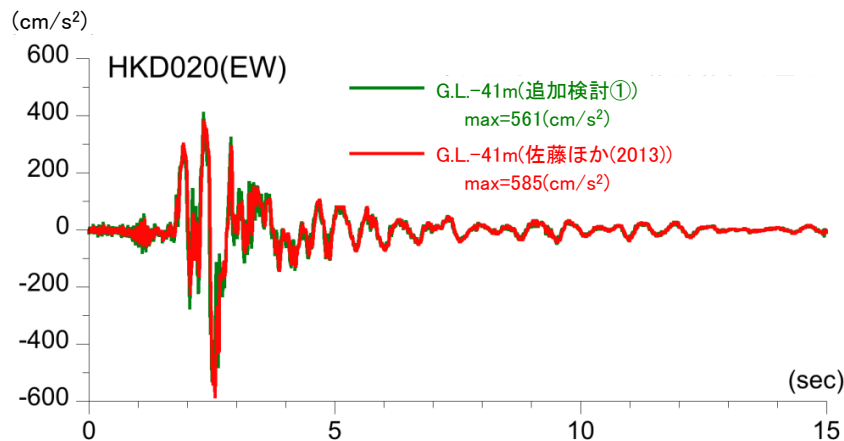
2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) e. 評価結果

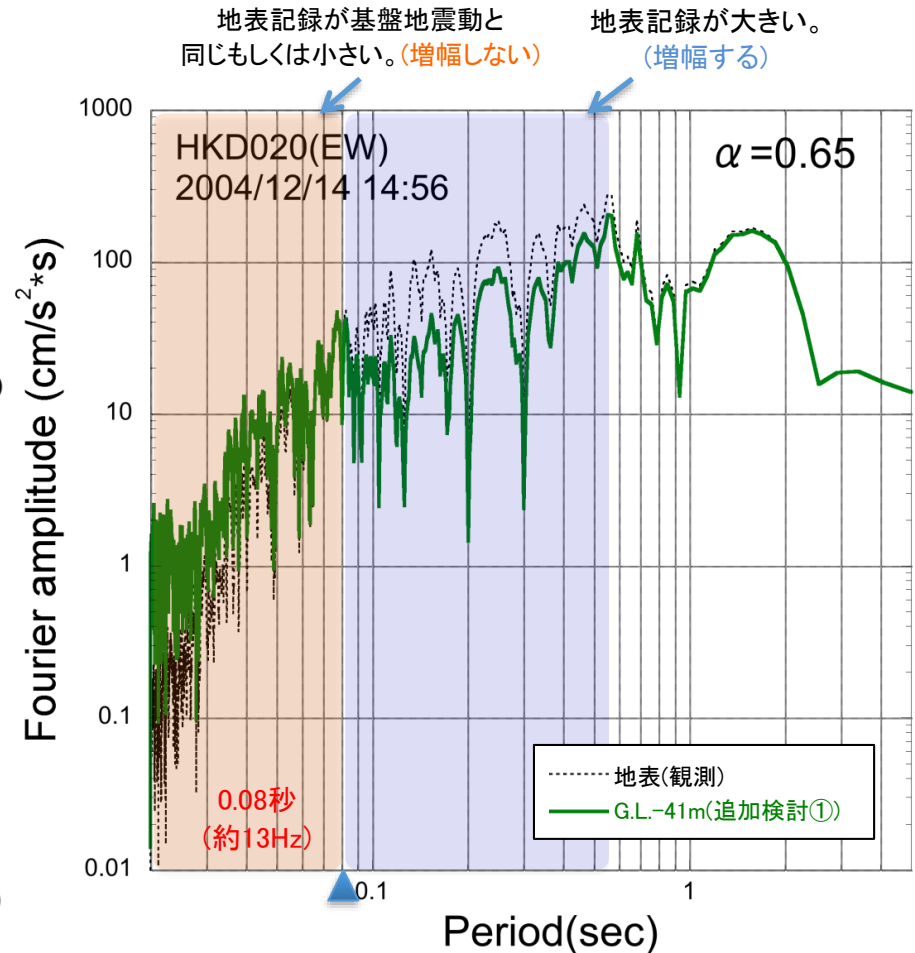
- G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動の最大加速度は 561cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較すると、やや小さく評価された。



地表観測記録と基盤地震動の比較



追加検討①と佐藤ほか(2013)の比較

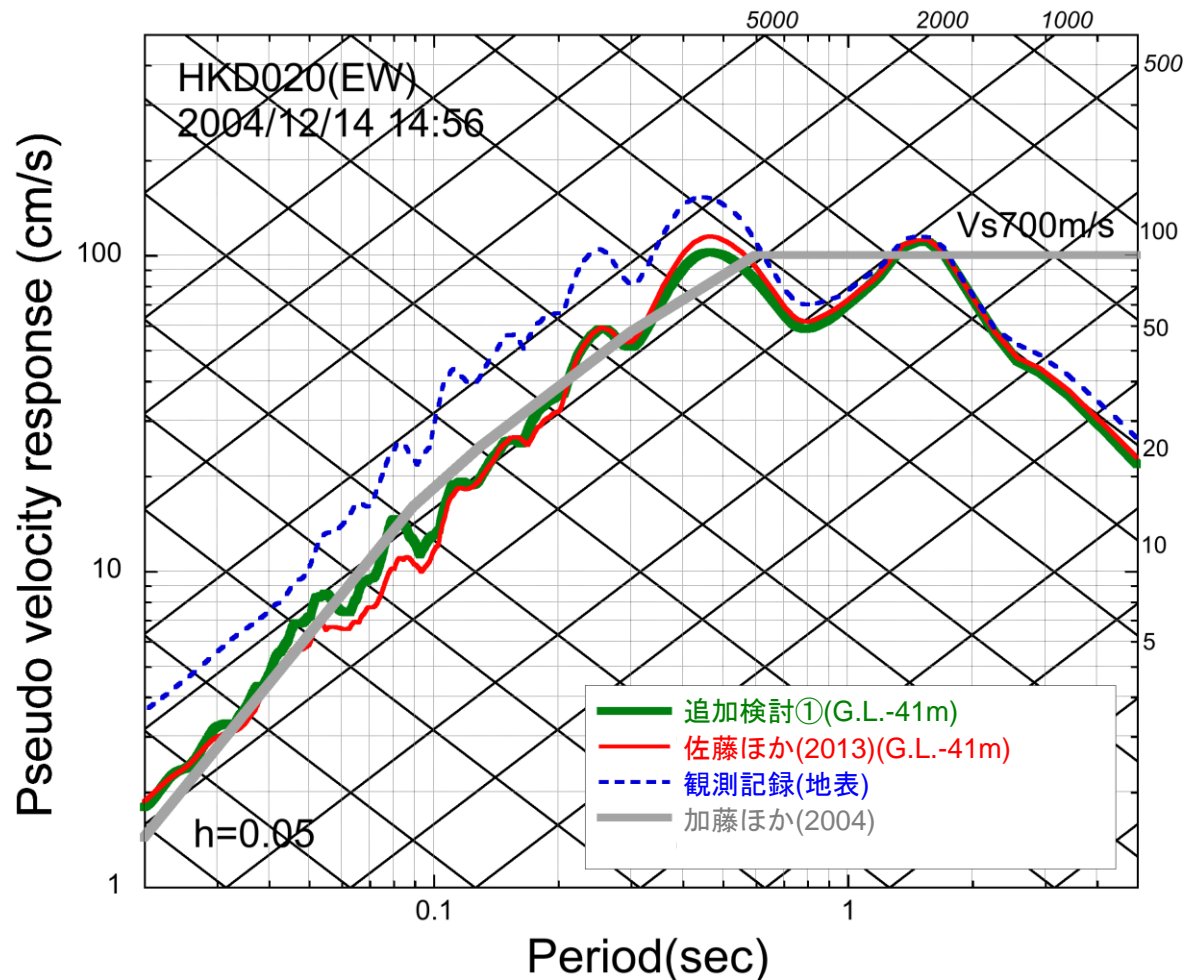


基盤地震動と地表観測記録の加速度
フーリエスペクトルの比較

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) f. 応答スペクトル

- G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。

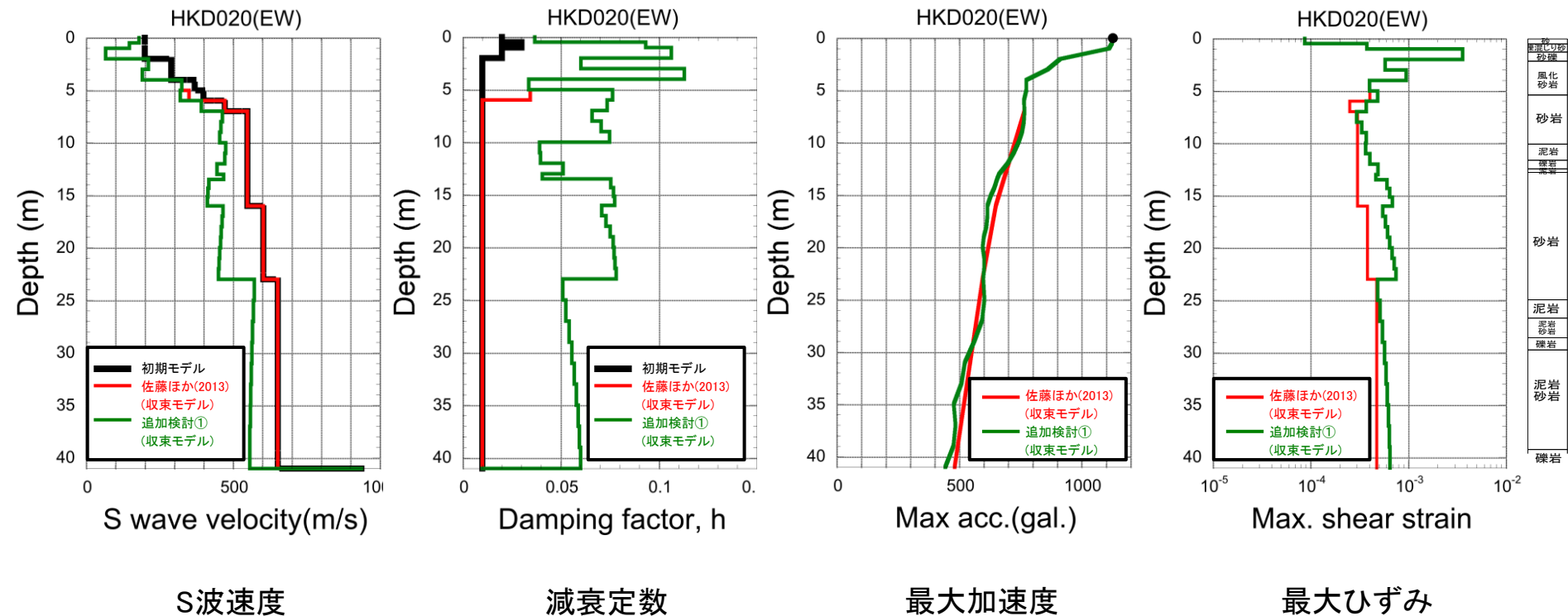


擬似速度応答スペクトルの比較

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) g. 収束物性値

➤ 収束物性値の深さ分布によると, G.L.-6m以深における減衰定数の収束物性値は, 概ね5%程度となっている。

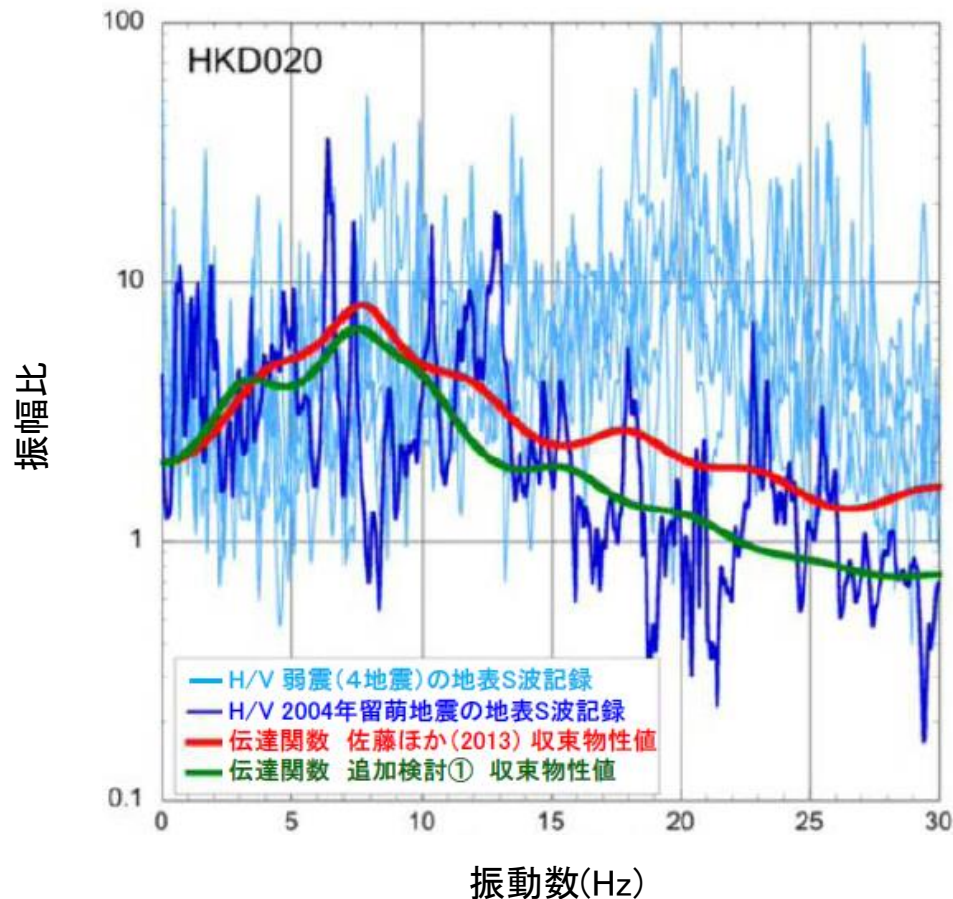


収束物性値, 最大加速度及び最大ひずみの深さ分布

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) h. 伝達関数

- G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動評価に用いた収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と比較して、深部の減衰定数が1%から5%程度になったことにより、10Hzより高振動数側で小さくなっている。



収束物性値による伝達関数とH/Vスペクトルの比較

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(2) 追加検討①: G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向) i. まとめ

- 2004年北海道留萌支庁南部の地震におけるHKD020(港町)の観測記録について、追加の室内試験結果を用い、G.L.-41m以浅に非線形性を考慮して基盤地震動を評価した。
- 基盤地震動の最大加速度は 561cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較してやや小さく評価されている。また、基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(3) 追加検討②: 減衰定数の不確かさを考慮した基盤地震動(水平方向) a. 地盤モデル

- 佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき, G.L.-6m以浅を非線形, G.L.-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価し, 佐藤ほか(2013)の評価結果と比較する。

等価線形解析に用いる地盤モデル

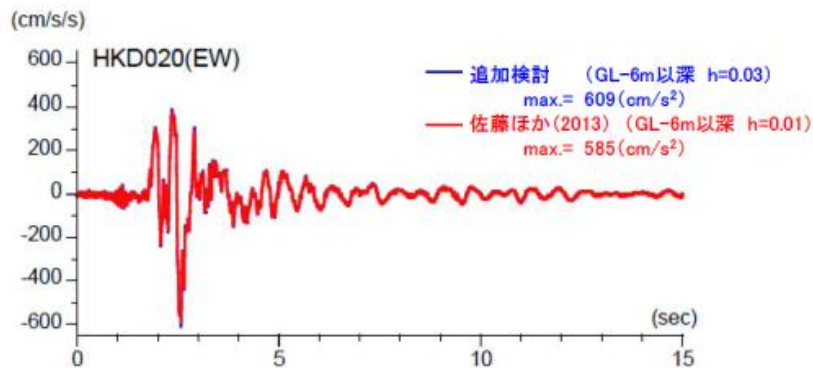
S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (1000kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数h (初期値)	非線形特性
200	1.9	0.5	0.02	砂
200	2.0	0.5	0.03	礫混じり砂
200	2.0	1	0.02	礫1
290	2.0	1	0.01	礫2
290	2.0	1	0.01	風化砂岩1
370	2.0	1	0.01	風化砂岩2
400	2.0	1	0.01	風化砂岩2
473	2.0	1	0.03	—
549	2.0	3	0.03	—
549	2.0	2	0.03	—
549	2.0	1	0.03	—
549	2.0	0.5	0.03	—
549	2.0	2.5	0.03	—
604	2.06	7	0.03	—
653	2.06	18	0.03	—
938	2.13	17	0.03	—

減衰定数3%として評価する。

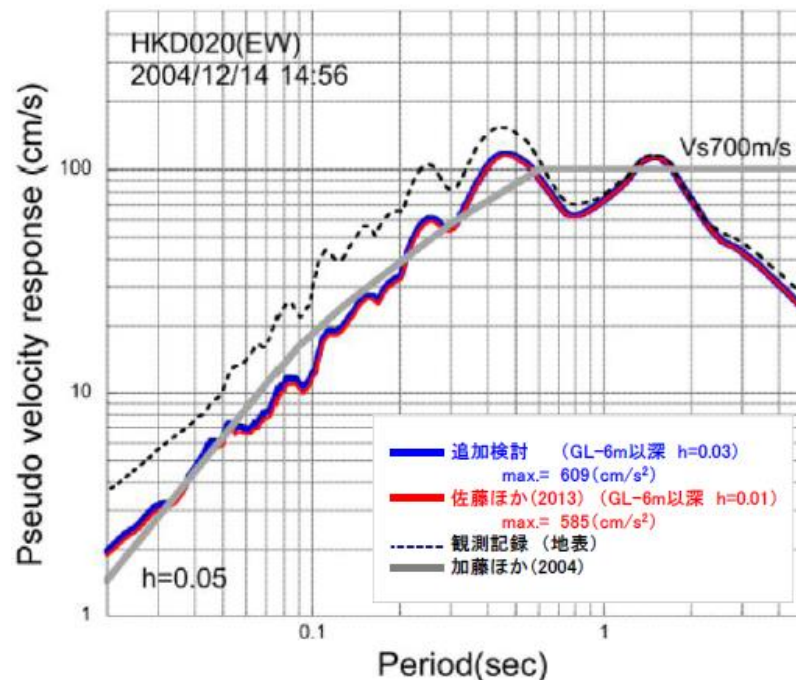
2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(3) 追加検討②: 減衰定数の不確かさを考慮した基盤地震動(水平方向) b. 評価結果

- 佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき, G.L.-6m以深を減衰定数3%とした基盤地震動の最大加速度は 609cm/s^2 となり, 佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較すると, やや大きく評価されている。また, その応答スペクトルは, 佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同程度となっている。



加速度時刻歴波形の比較

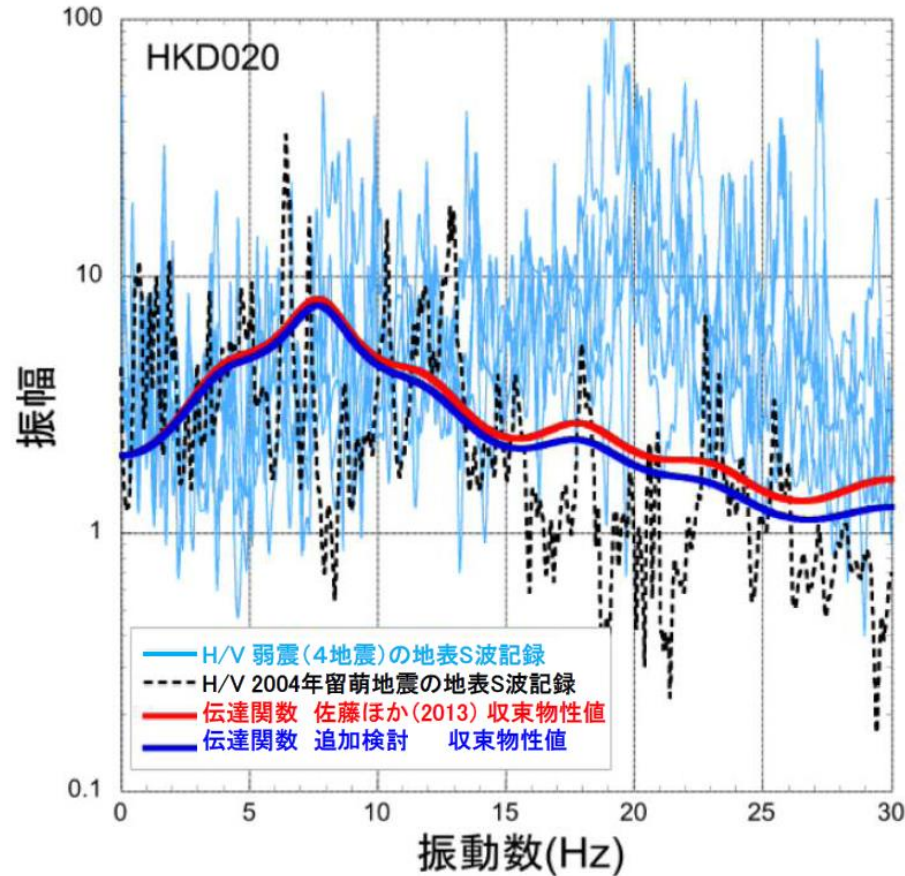


擬似速度応答スペクトルの比較

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(3) 追加検討②: 減衰定数の不確かさを考慮した基盤地震動(水平方向) c. 伝達関数

- 収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と同様に、本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現していると考えられる。



収束物性値による伝達関数とH/Vスペクトルの比較

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(3) 追加検討②: 減衰定数の不確かさを考慮した基盤地震動(水平方向) d. まとめ

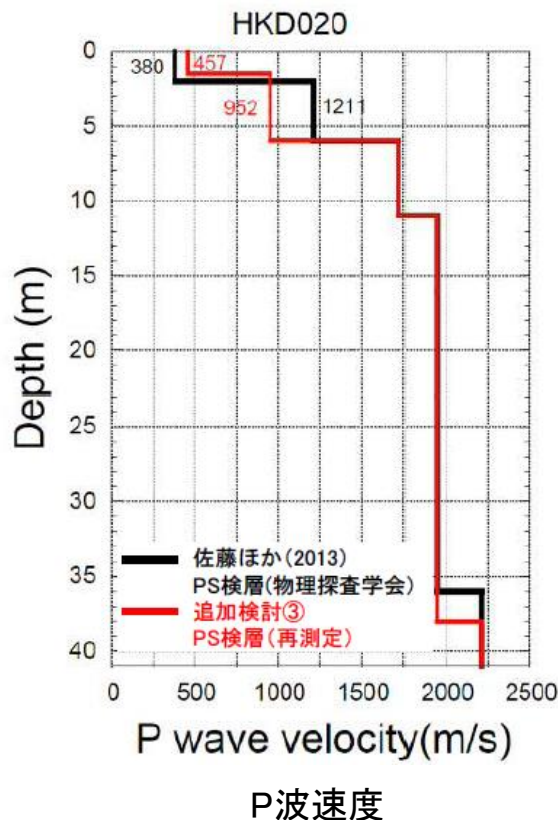
- 2004年北海道留萌支庁南部の地震におけるHKD020(港町)の観測記録について、佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、G.L.-6m以浅を非線形、G.L.-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価した。
- 基盤地震動の最大加速度は 609cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較してやや大きく評価されている。また、基盤地震動の応答スペクトルは、佐藤ほか(2013)による応答スペクトルとほぼ同等となっている。
- 収束物性値による伝達関数は、佐藤ほか(2013)の物性値による伝達関数と同様に、本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現する結果となっている。

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(4) 追加検討③: 地盤モデル変更による基盤地震動評価(鉛直方向) a. 地盤モデル

- 佐藤ほか(2013)における鉛直方向の基盤地震動の評価結果は、佐藤ほか(2013.10)時点での地盤モデルに基づいていたが、笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できないことから、佐藤ほか(2013)の報告時点以降に、表層部分のPS検層を再測定している。
- 再測定結果によるG.L.-6m以浅のP波速度は、佐藤ほか(2013)の地盤モデルと異なるため、再測定結果を反映した地盤モデルにより、鉛直方向の基盤地震動が再評価された。

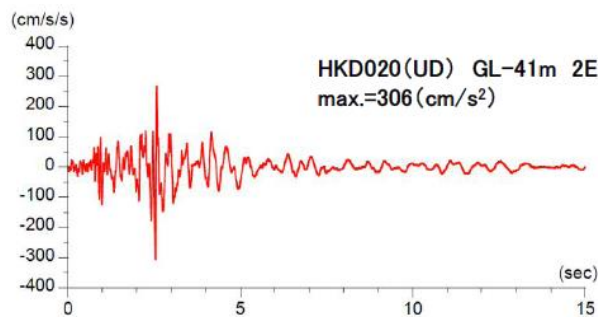
※再測定結果によるS波速度は、佐藤ほか(2013)の地盤モデルとほぼ同様のため変更していない。



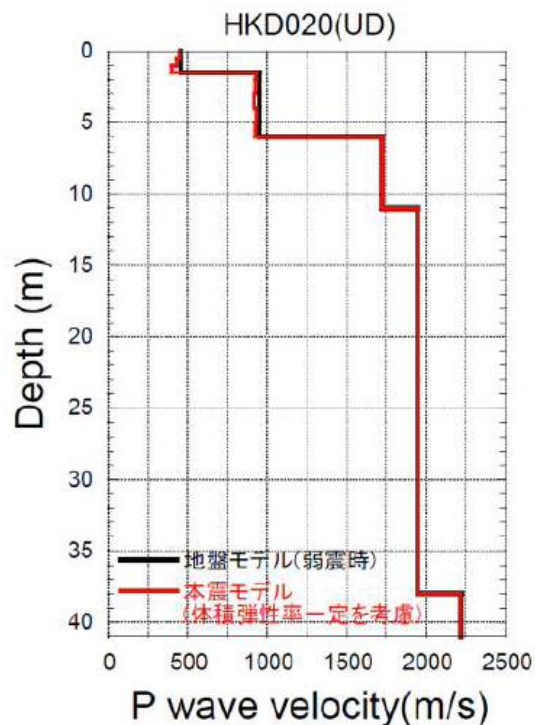
2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(4) 追加検討③: 地盤モデル変更による基盤地震動評価(鉛直方向) b. 評価結果

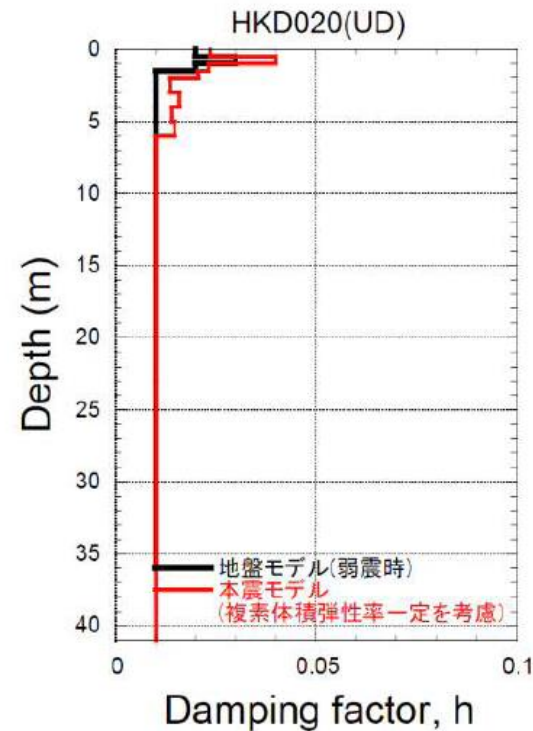
- PS検層の再測定結果を反映した地盤モデルを用い、体積弾性率一定としてG.L.-41mの鉛直方向の基盤地震動を評価した結果、その最大加速度は 306cm/s^2 となり、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(296cm/s^2)と比較すると、やや大きく評価された。



加速度時刻歴波形



P波速度



減衰定数

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

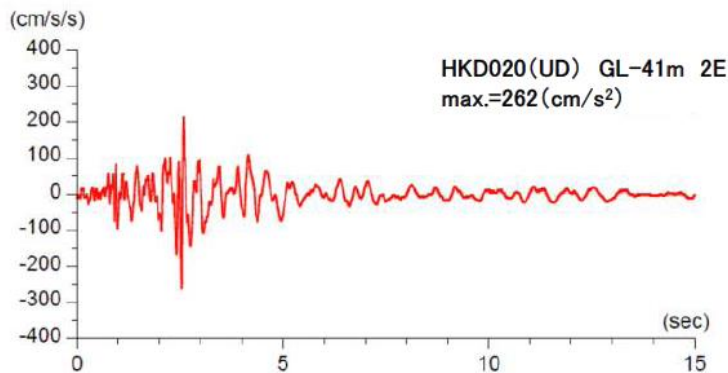
(4) 追加検討③: 地盤モデル変更による基盤地震動評価(鉛直方向) c. まとめ

- 佐藤ほか(2013)のHKD020(港町)のP波速度モデルは, 笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できないことから表層部分のPS検層を再測定し, 再測定結果を反映した地盤モデルを設定した。
- 上記地盤モデルを用い, 体積弾性率一定としてG.L.-41mの鉛直方向の基盤地震動を評価した結果, その最大加速度は 306cm/s^2 となり, 佐藤ほか(2013)による基盤地震動(296cm/s^2)と比較すると, やや大きい。

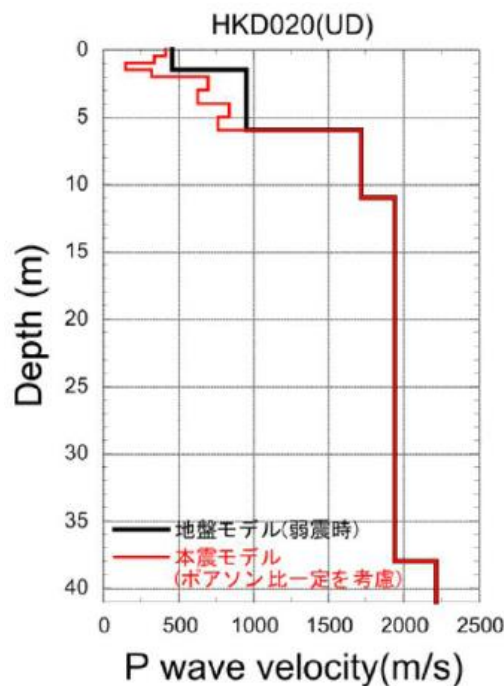
2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(5) 追加検討④: G.L.-6m以浅をポアソン比一定とした基盤地震動(鉛直方向) a. 評価結果

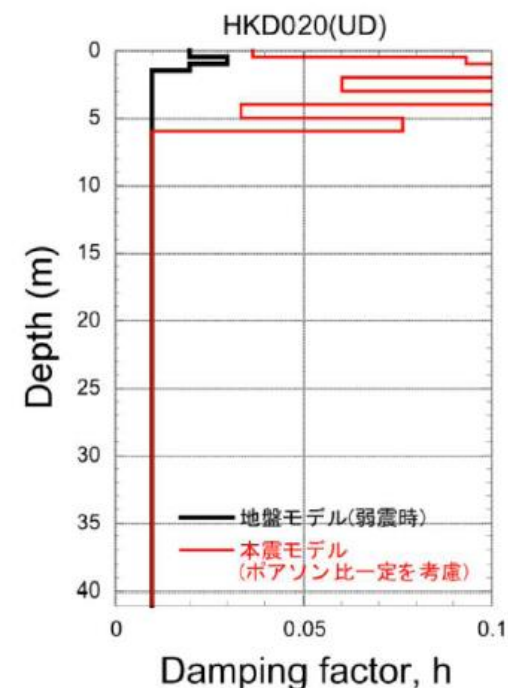
- 佐藤ほか(2013)及び追加検討③における鉛直方向の基盤地震動は、体積弾性率一定として評価しているが、地下水位の状況を踏まえ、G.L.-6m以浅をポアソン比一定、G.L.-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価した。
- 体積弾性率一定とした場合と比較して、ポアソン比一定とした場合、S波速度の低下に伴ってP波速度も低下するため、最大加速度は小さくなっている。
- その結果、最大加速度は262cm/s²となり、体積弾性率一定と仮定した結果(306cm/s²)は保守的な結果となっている。



加速度時刻歴波形



P波速度



減衰定数

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(5) 追加検討④: G.L.-6m以浅をポアソン比一定とした基盤地震動(鉛直方向) b. まとめ

- 地下水位の状況を踏まえ、G.L.-6m以浅をポアソン比一定、G.L.-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価した。
- G.L.-41mの基盤地震動を評価した結果、その最大加速度は 262cm/s^2 となり、体積弾性率一定と仮定した結果(306cm/s^2)は保守的な結果となっている。

2.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討

(6)まとめ(震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する基盤地震動)

- 佐藤ほか(2013)による2004年北海道留萌支庁南部の地震におけるHKD020(港町)の基盤地震動評価について、以下の追加検討を実施した。
 - ① G.L.-41m以浅に非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向)
 - ② G.L.-6m~G.L.-41mの減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)
 - ③ 再測定されたPS検層結果を踏まえた基盤地震動評価(鉛直方向)
 - ④ 地下水位の状況を踏まえG.L.-6m以浅をポアソン比一定とした基盤地震動評価(鉛直方向)
- 上記の①~④の検討結果によると、HKD020(港町)の基盤地震動は水平方向については追加検討②の結果(609cm/s^2)、鉛直方向については追加検討③の結果(306cm/s^2)が最も大きいものとなった。



震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する基盤地震動として、水平方向は最大加速度 609cm/s^2 の基盤地震動、鉛直方向は最大加速度 306cm/s^2 の基盤地震動を採用する。

2.4 震源を特定せず策定する地震動に考慮する地震動 (1) 基盤地震動を踏まえた地震動の設定

- 「震源を特定せず策定する地震動」の評価に反映する2004年北海道留萌支庁南部の地震の基盤地震動として、水平方向は最大加速度 609cm/s^2 の基盤地震動、鉛直方向は最大加速度 306cm/s^2 の基盤地震動を採用する。
- なお、下表のとおり、PS検層結果から得られているHKD020(港町)の基盤層(G.L.-41m)におけるS波速度は 938m/s 、P波速度は 2215m/s であり、一方、東通原子力発電所の解放基盤表面の振動特性を代表する位置※におけるS波速度は 1300m/s 、P波速度は 2250m/s である。
- 東通原子力発電所のS波速度及びP波速度は、HKD020(港町)の基盤層のS波速度及びP波速度をそれぞれ上回っているため、本検討結果は地盤条件的に保守性のあるものとなっている。

※: 解放基盤表面の位置は、原子炉建屋設置レベルであるT.P.-16.3mに設定しているが、解放基盤表面の振動特性は、建屋の影響を受けず、振幅が原子炉建屋設置レベルと同等以上である自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)で代表している。
[第943回審査会合(2021.2.5)資料1-2-2 p.41参照]

基盤におけるS波及びP波速度の比較

	HKD020(港町)の基盤層(G.L.-41m)	東通原子力発電所の解放基盤表面の振動特性を代表する位置
S波速度	938m/s	1300m/s
P波速度	2215m/s	2250m/s

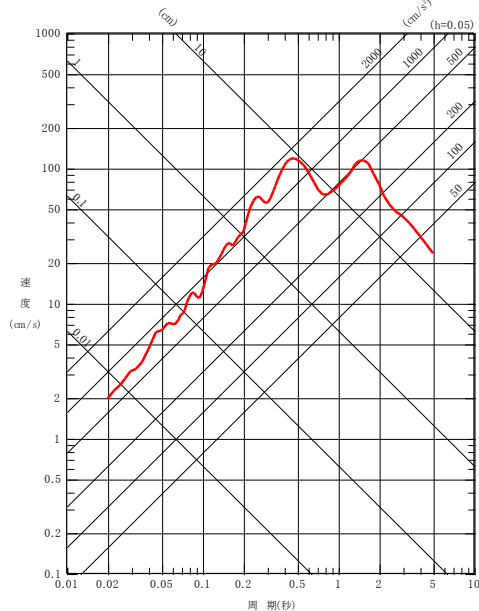


「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動として、更なる保守性を考慮し、水平方向の最大加速度 620cm/s^2 、鉛直方向の最大加速度 320cm/s^2 の地震動を設定する。

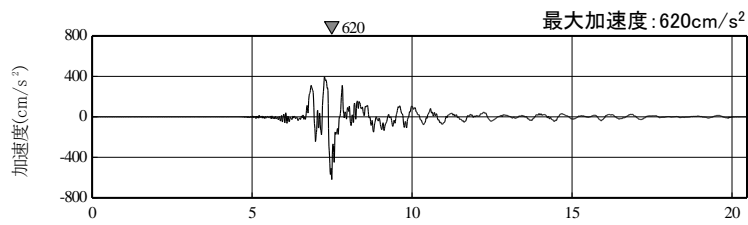
2.4 震源を特定せず策定する地震動に考慮する地震動 (2) 応答スペクトル, 加速度波形

- 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動の応答スペクトル及び加速度波形を示す。
- 参考として、基盤地震動の評価結果との比較を参考資料(本資料p.60)に示す。

— : 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(水平)

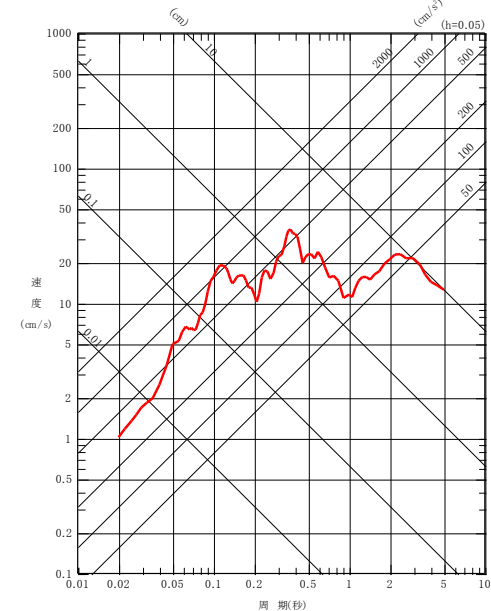


応答スペクトル

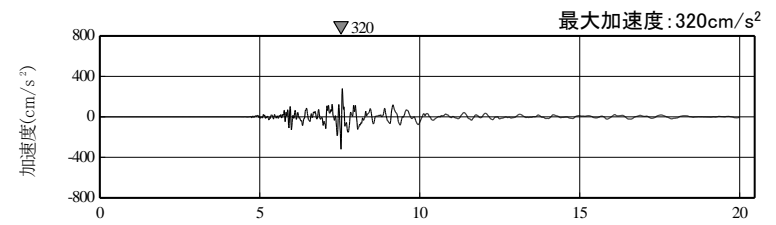


時間(秒)
加速度波形(水平)
水平方向

— : 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(鉛直)



応答スペクトル



時間(秒)
加速度波形(鉛直)
鉛直方向

3. 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価

- 3. 1 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価概要
- 3. 2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価
- 3. 3 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価
- 3. 4 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果

3. 1 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価概要 (1) 標準応答スペクトルの概要と評価方針

➤ 地震基盤相当面(せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上)で定義された標準応答スペクトルに基づき、解放基盤表面(せん断波速度 $V_s=1300\text{m/s}$)における地震動を評価する。

➤ 標準応答スペクトルの概要

震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面(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で、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。)における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。)として次の図に示すもの。

改正 令和3年4月21日 原規技発第2104216号 原子力規制委員会決定「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」による。

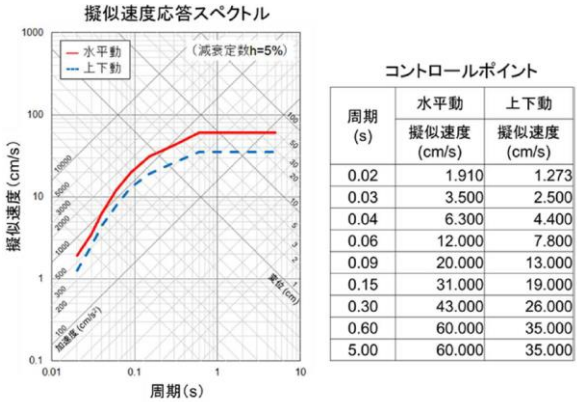


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル



東通原子力発電所	評価方針
解放基盤表面※1の せん断波速度 V_s 1300m/s	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を作成し、地下構造モデルによって地震基盤相当面から解放基盤表面までの地盤補正を考慮する。 ➤ 審査ガイド※2を踏まえ、模擬地震波は、複数の方法によることが望ましいが、敷地での適切な観測記録が得られていないこと等から一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによる方法により作成する。

※1: 解放基盤表面の位置は、原子炉建屋設置レベルであるT.P.(東京湾平均海面)-16.3m。
解放基盤表面の振動特性は、自由地盤の岩盤上部の地震観測点(T.P.+2.0m)で代表する。

※2: 審査ガイド(基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド 5.基準地震動)では、「震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル(地震動レベル)に対して、地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的変化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には、複数の方法(例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等)により検討が行われていることを確認する。」とされている。

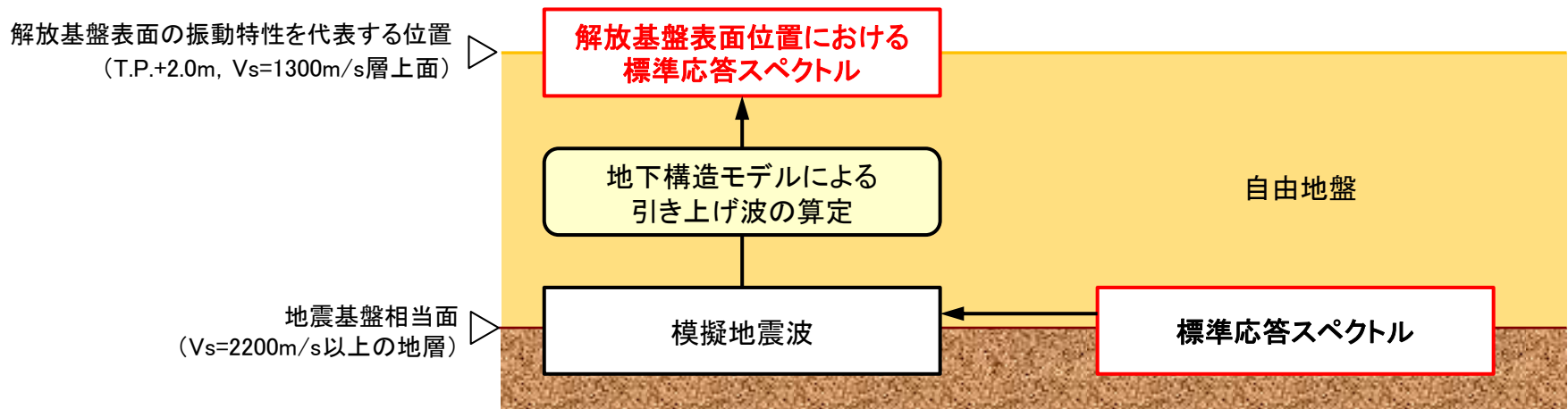
3.1 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価概要

(2) 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルの評価概要

- ▶ 地震基盤相当面において作成した標準応答スペクトルに対し所定の適合度[※]を有する模擬地震波を、統計的グリーン関数法による地震動評価に用いる地下構造モデルにより解放基盤表面位置まで引き上げる。

※:原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-2015(日本電気協会, 2016)に示される以下の適合度の条件を満足するように作成する。

- ①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
- ②目標とする応答スペクトル強さに対する模擬地震波の応答スペクトル強さの比(SI比, 周期0.1~2.5秒)が1.0以上



評価概要図

3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価 (1) 模擬地震波の作成方法

➤ 一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する模擬地震波の振幅包絡線の経時的变化は、以下の諸元を用いてNoda et al.(2002)の方法により評価する。

・振幅包絡線の経時的变化算定の諸元: マグニチュード7.0, 等価震源距離10km

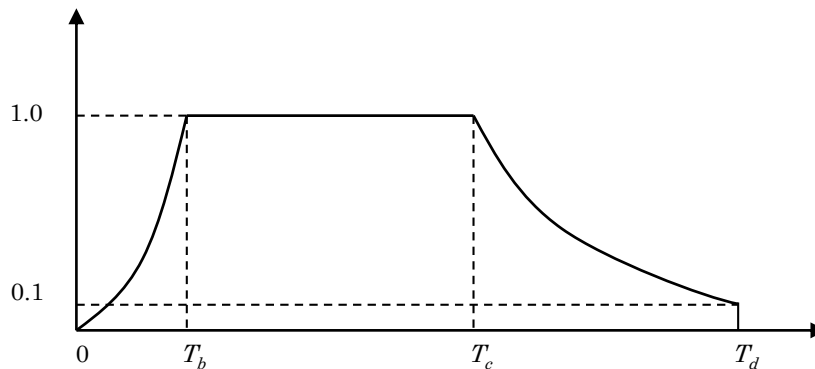
地震規模は、武村(1990)の M_0 - M 関係及びKanamori(1977)の M_0 - M_w 関係から導かれる経験式($M_w=0.78M+1.08$)と、全国共通に考慮すべき地震動の地震規模(M_w 6.5程度未満)との関係から、 M_w 6.5の場合の M は約6.95となることから M 7.0に設定。

また、等価震源距離は、敷地近傍(半径10km程度以内の領域)で発生する地震を想定し、継続時間が長めとなるよう10kmに設定。

なお、マグニチュードについては6.9*から7.0に見直していることから、参考としてマグニチュード6.9とした場合の振幅包絡線の経時的变化も記載する。

※: 第1039回審査会合(2022.4.11)資料1-1-3, p.35参照

マグニチュード M	等価震源距離 X_{eq} (km)	振幅包絡線の経時的变化(s)		
		T_b	T_c	T_d (継続時間)
7.0	10	3.72	16.31	29.80
(参考)6.9	10	3.31	15.06	28.03



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

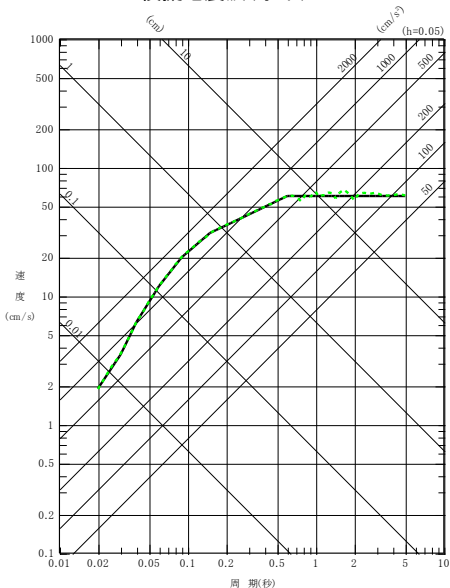
$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

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

振幅包絡線の経時的变化

3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価 (2) 模擬地震波の作成結果

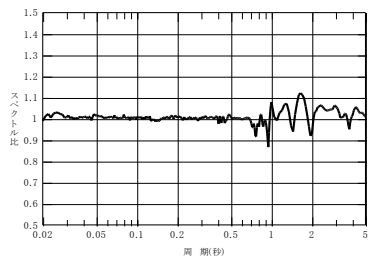
— : 標準応答スペクトル(目標スペクトル)(水平)
- - - : 模擬地震波(水平)



適合度(水平)

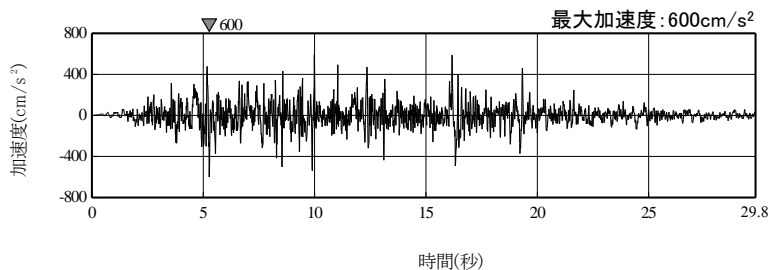
① 応答スペクトル比の最小値	0.87
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.02

— : 応答スペクトル比(水平)
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル(水平)

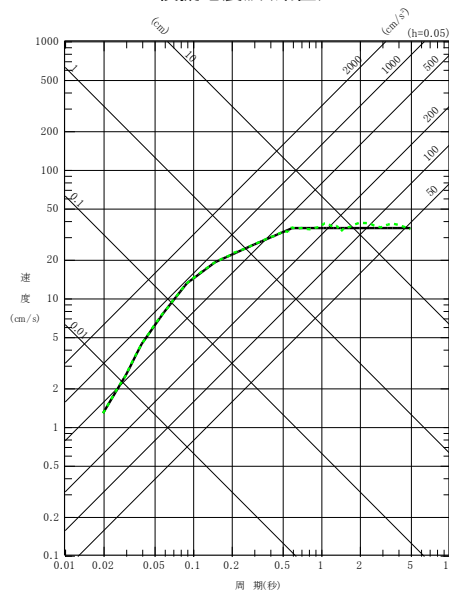
標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比(水平)



加速度波形(水平)

水平方向

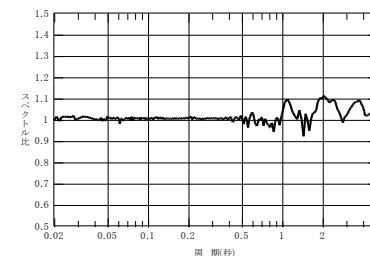
— : 標準応答スペクトル(目標スペクトル)(鉛直)
- - - : 模擬地震波(鉛直)



適合度(鉛直)

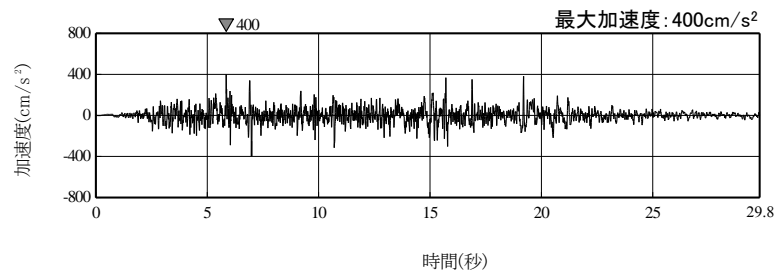
① 応答スペクトル比の最小値	0.92
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.03

— : 応答スペクトル比(鉛直)
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル(鉛直)

標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比(鉛直)



加速度波形(鉛直)

鉛直方向

地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波

3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価 (3) 解放基盤表面位置における地震動の評価方法

S227

- 地盤補正には、統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルを用いる。〔第943回審査会合(2021.2.5)資料1-2-2 p.121参照〕
- 当該地下構造モデルを採用した場合、地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ を上回る V_s の値を示す層)の要件を満たす層はT.P.-282.8m以深の層が該当するが、模擬地震波の入力位置は、この該当層の中から東通の地下構造モデルの特徴を踏まえ以下の2箇所を選定する。
 - ①T.P. -282.8m: $V_s=2200\text{m/s}$ を上回る最も浅い位置(当該レベルではPS検層により $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層が確認されていることを考慮)。
 - ②T.P.-2987.8m: $V_p=4200\text{m/s}$ を上回る位置〔Noda et al.(2002)で示される地震基盤として、 $V_{sb}=2200\text{m/s}$ の他に $V_{pb}=4200\text{m/s}$ が挙げられていることを考慮〕。
- 作成した模擬地震波に対して、各入力位置から解放基盤表面〔基準地震動の振動特性を代表する位置(T.P.+2.0m, $V_s=1300\text{m/s}$, $V_p=2250\text{m/s}$ 層上面)〕までの地盤補正を行い、T.P.-282.8mを入力位置とした場合の解放基盤表面における地震動(以下、「標準応答スペクトルに基づく地震動A」という。)と、T.P.-2987.8mを入力位置とした場合の解放基盤表面における地震動(以下、「標準応答スペクトルに基づく地震動B」という。)を評価する。

地盤補正に用いる地下構造モデル

T.P. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q_s	Q_p
+2.0	—	—	—	—	—	—
-7.0	9.0	2.24	1300	2250	$1.23f^{0.74}$	$2.33f^{0.50}$
-62.0	55.0	2.24	1790	3060	$1.23f^{0.74}$	$2.33f^{0.50}$
-82.8	20.8	2.72	1800	3340	$1.23f^{0.74}$	$2.33f^{0.50}$
-106.0	23.2	2.72	1800	3340	$1.23f^{0.74}$	$2.33f^{0.50}$
-166.0	60.0	2.30	1910	3350	$8.91f^{0.94}$	$5.55f^{0.50}$
-190.0	24.0	2.30	2030	3360	$8.91f^{0.94}$	$5.55f^{0.50}$
-252.0	62.0	2.30	2100	3390	$8.91f^{0.94}$	$5.55f^{0.50}$
-282.8	30.8	2.33	2090	3690	$8.91f^{0.94}$	$5.55f^{0.50}$
-574.8	292.0	2.44	2390	3690	100	100
-1495.8	921.0	2.45	2460	3750	100	100
-2441.8	946.0	2.48	2590	3960	100	100
-2987.8	546.0	2.50	2680	4160	100	100
	∞	2.63	3340	5800	150	150

解放基盤表面の
振動特性を代表する位置

標準応答スペクトルに基づく
地震動Aの入力位置
($V_s=2390\text{m/s}$,
 $V_p=3690\text{m/s}$ 層上面)

標準応答スペクトルに基づく
地震動Bの入力位置
(地震基盤位置)
($V_s=3340\text{m/s}$,
 $V_p=5800\text{m/s}$ 層上面)

□: 地震観測点位置を示す。

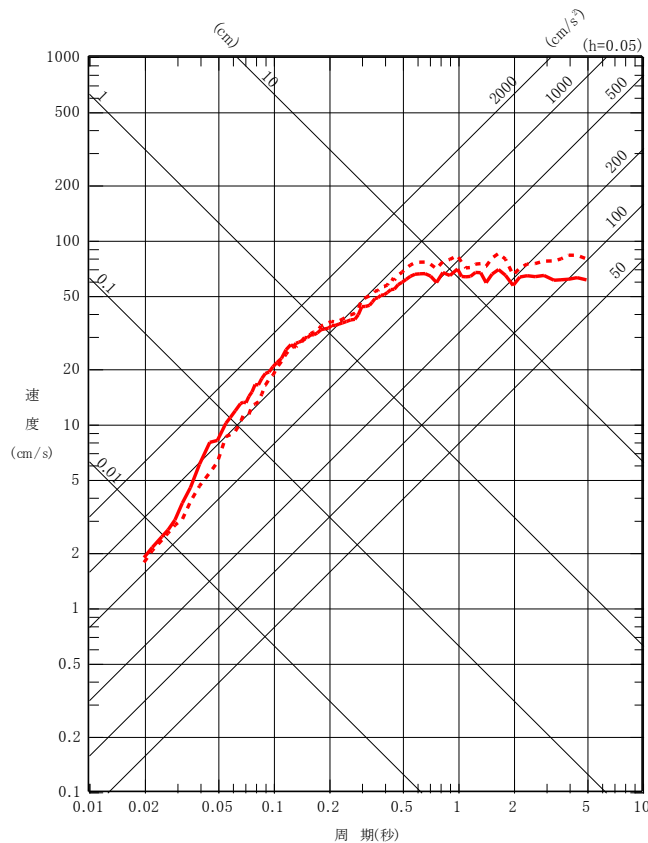
3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価

(4) 解放基盤表面位置における地震動の評価結果(応答スペクトル)

S227

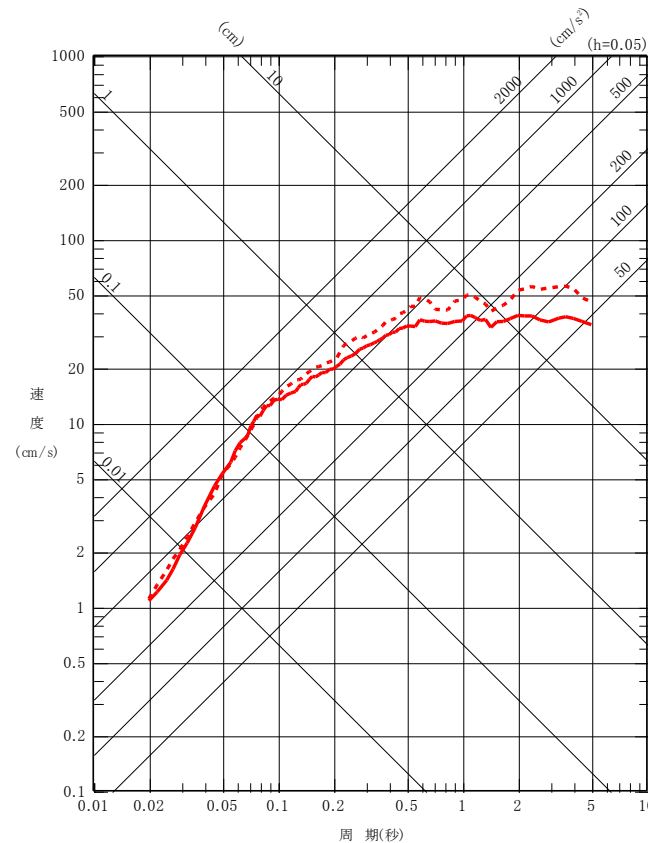
- ▶ 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(一様乱数)を地下構造モデルを用いて各入力位置から解放基盤表面位置($V_s=1300\text{m/s}$)に引き上げた地震動(標準応答スペクトルに基づく地震動A及びB)について、応答スペクトルを示す。
- ▶ なお、 $V_s=2200\text{m/s}$ を上回るその他3箇所の速度境界面から入力した場合の解放基盤表面における地震動は、これらの地震動と同等以下であることを確認している。[参考資料(本資料p.67, 68)参照]

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(水平)※
- - - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(水平)



水平方向

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(鉛直)※
- - - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(鉛直)



鉛直方向

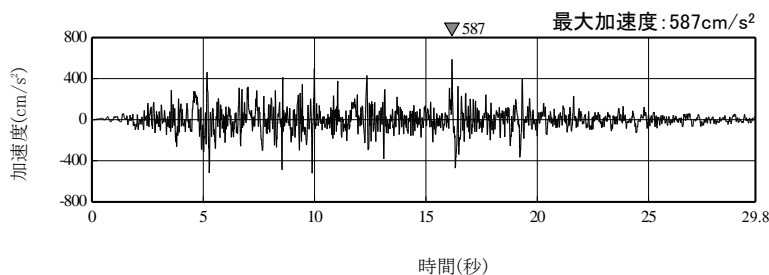
※: 高振動数側(20Hz以上)にフィルター処理を実施。(ゆがみ除去)(以降、同様の処理を実施)

3.2 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価

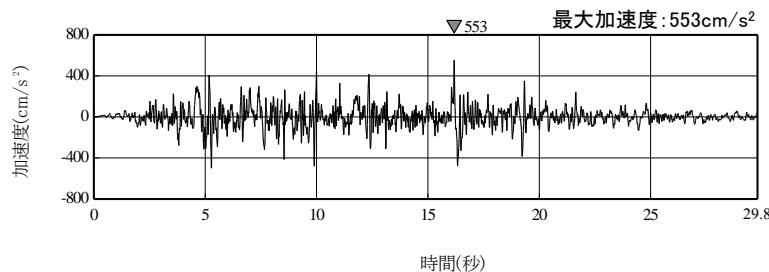
(5) 解放基盤表面位置における地震動の評価結果(加速度波形)

S227

- ▶ 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(一様乱数)を地下構造モデルを用いて各入力位置から解放基盤表面位置($V_s=1300\text{m/s}$)に引き上げた地震動(標準応答スペクトルに基づく地震動A及びB)について、加速度波形を示す。

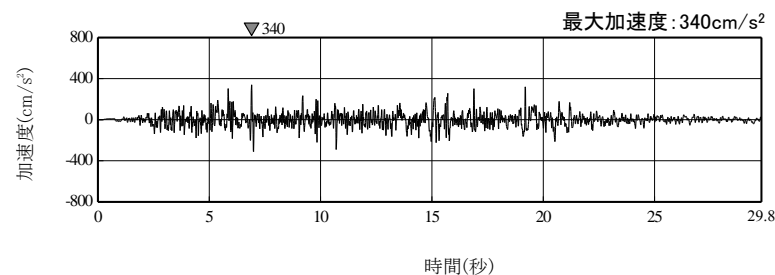


標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 水平)

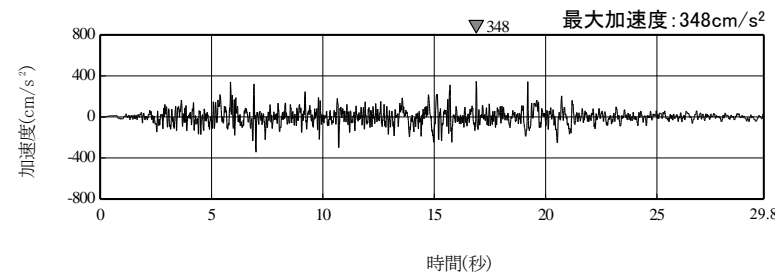


標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 水平)

水平方向



標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 鉛直)



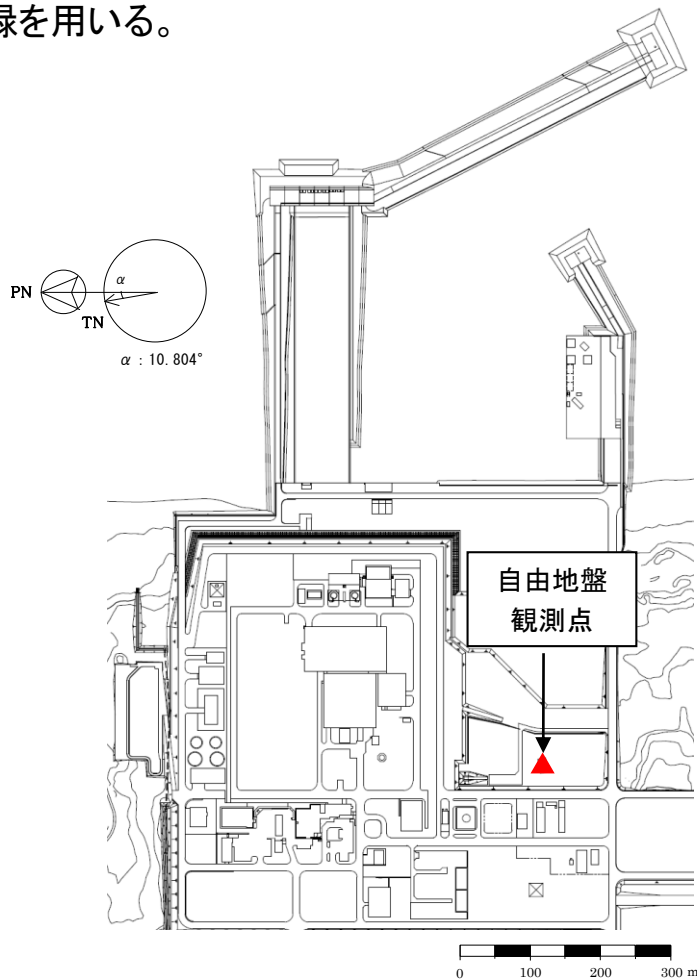
標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 鉛直)

鉛直方向

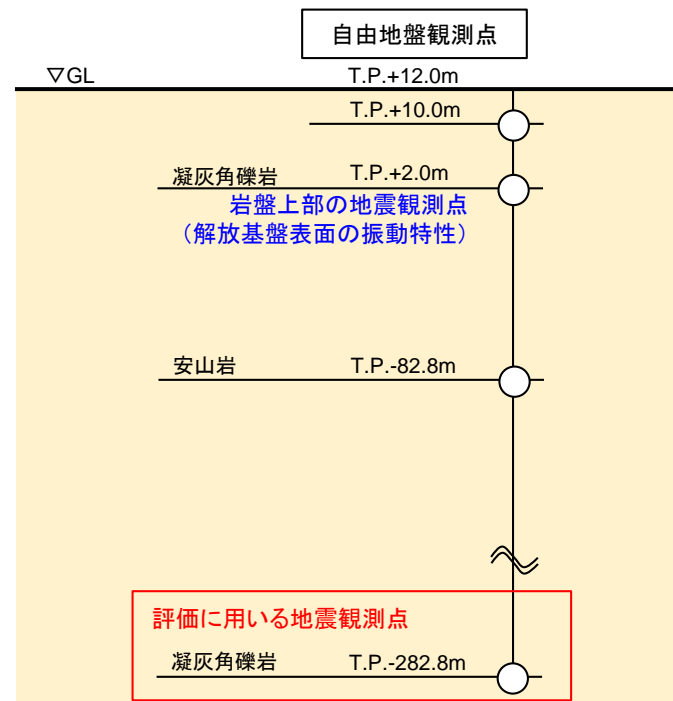
3.3 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価

(1) 敷地における地震観測, 模擬地震波作成に用いる地震観測点

- 敷地における自由地盤観測点では, 原子炉建屋設置位置付近と同じ岩盤に地震計を設置し1994年4月から観測を行っている。
- 地震基盤位置での観測記録の位相特性を用いた模擬地震波の作成にあたっては, 最深部のT.P.-282.8mの観測記録を用いる。



平面配置図



凡例 ○ : 地震観測点

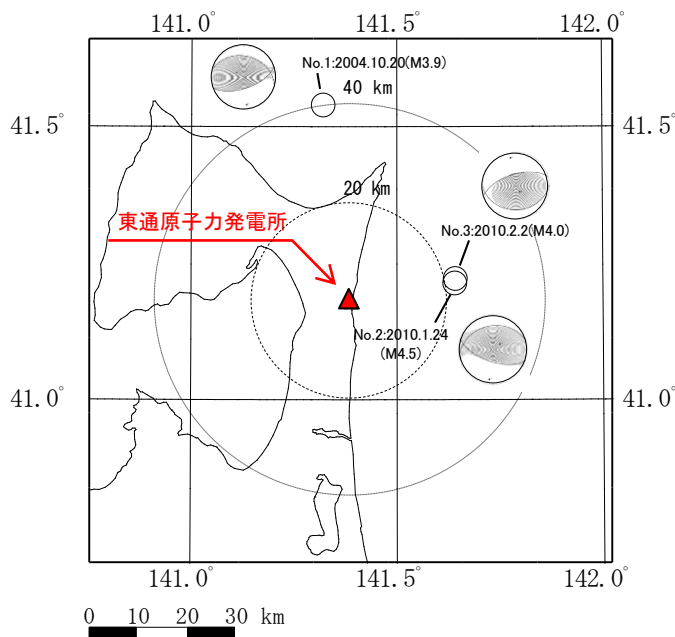
地震計鉛直断面位置図

3.3 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価 (2) 模擬地震波の作成に用いる地震の選定

- 敷地の近くで発生した内陸地殻内地震による観測記録を用いることにより、内陸地殻内地震としての震源特性、伝播特性及びサイト特性を反映することが可能になるが、東通原子力発電所では敷地近傍(半径10km以内)における規模の大きい内陸地殻内地震の観測記録は得られていない。
- 範囲を拡げ、震央距離40km以内、震源深さ20km以浅、地震規模M4程度以上とした条件では3地震が抽出されたが、いずれも規模が小さく、その観測記録(応答スペクトル)は長周期成分が不足している。
- 以上より、敷地において適切な内陸地殻内地震の観測記録は得られていないことを確認した。また、下北半島では他機関においても内陸地殻内地震震源近傍の大きな観測記録は得られていない。

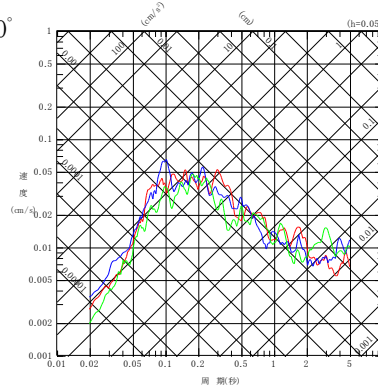
抽出された3地震の諸元

No.	年	月	日	時	分	東経		北緯		M	震源深さ (km)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	最大加速度 (cm/s ²)
						(°)	(')	(°)	(')					
1	2004	10	20	11	16	141	19.49	41	32.17	3.9	7.84	40	41	1.1
2	2010	1	24	16	19	141	38.71	41	12.59	4.5	13.63	22	26	5.9
3	2010	2	2	22	48	141	38.74	41	13.09	4.0	12.48	22	25	1.5



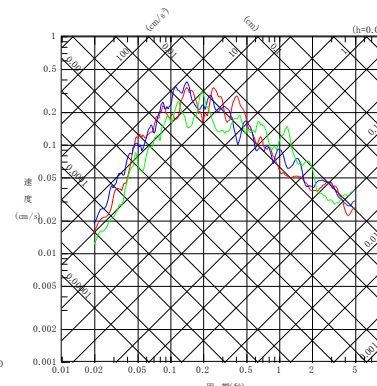
敷地周辺の内陸地殻内地震(M4程度以上)の
観測地震の震央分布
(震央:気象庁, 震源メカニズム解:F-net)

— : NS成分
— : EW成分
— : UD成分



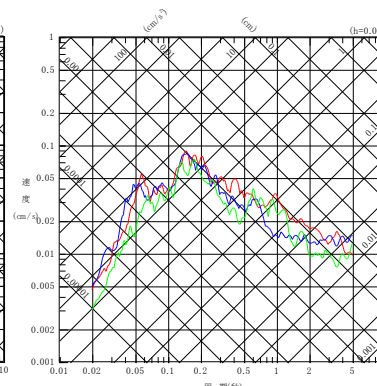
No.1:2004.10.20(M3.9)

— : NS成分
— : EW成分
— : UD成分



No.2:2010.1.24(M4.5)

— : NS成分
— : EW成分
— : UD成分

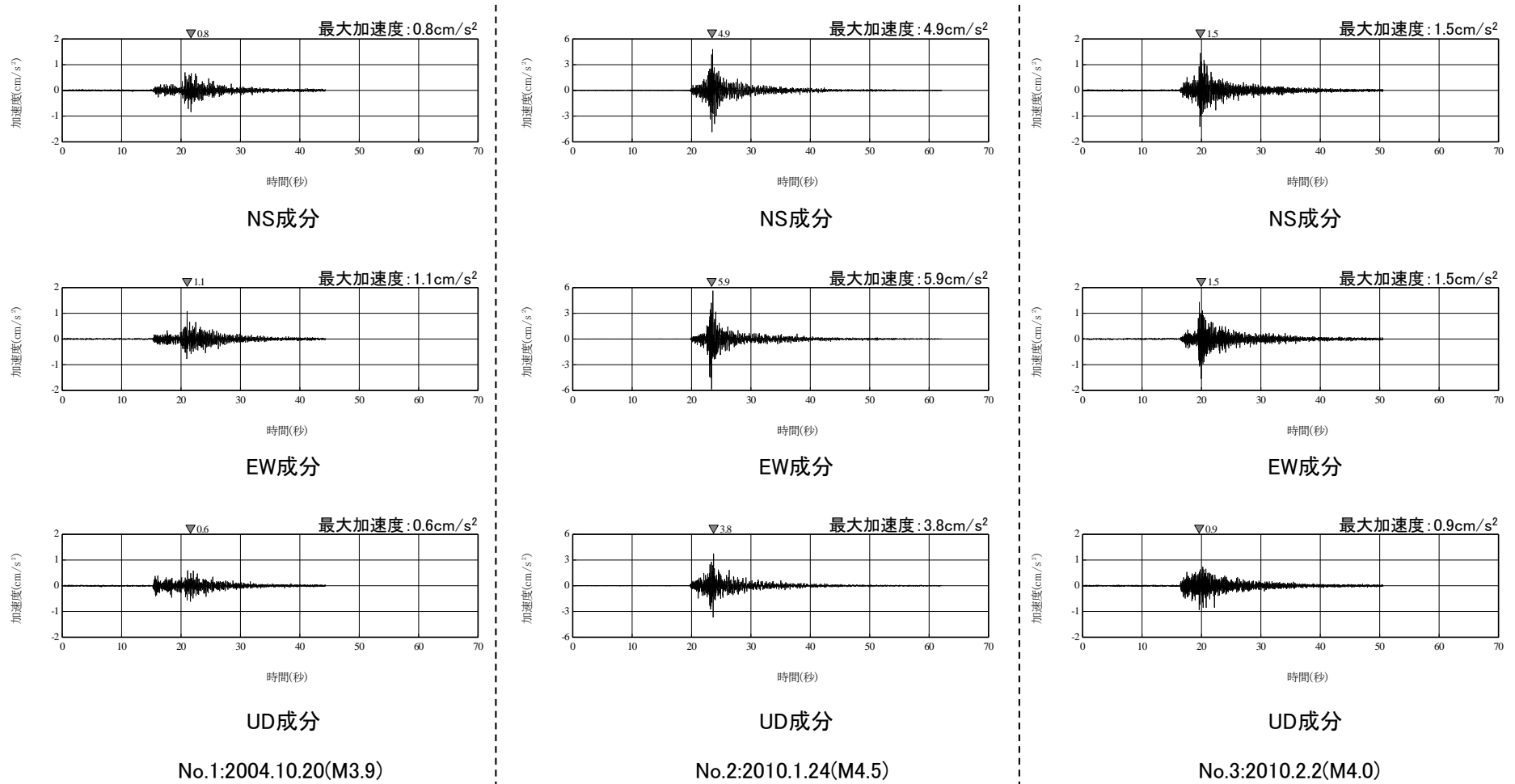


No.3:2010.2.2(M4.0)

応答スペクトル

3.3 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価 (3) 模擬地震波の作成に用いる地震の選定 加速度波形

▶ 前頁で抽出した地震における敷地での観測記録(加速度波形)は、いずれも振幅が大きい区間は短い。



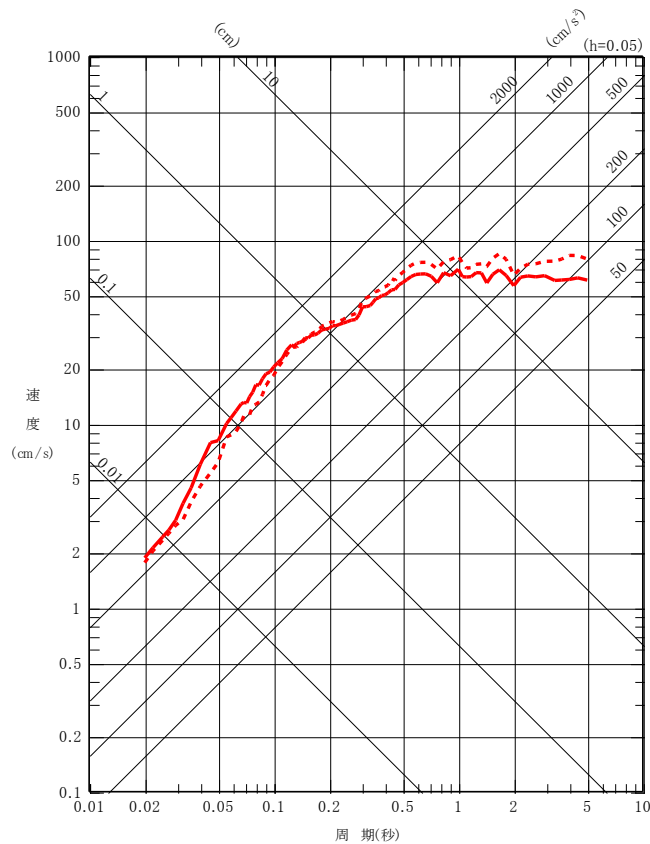
加速度波形

3.4 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果(応答スペクトル)

S227

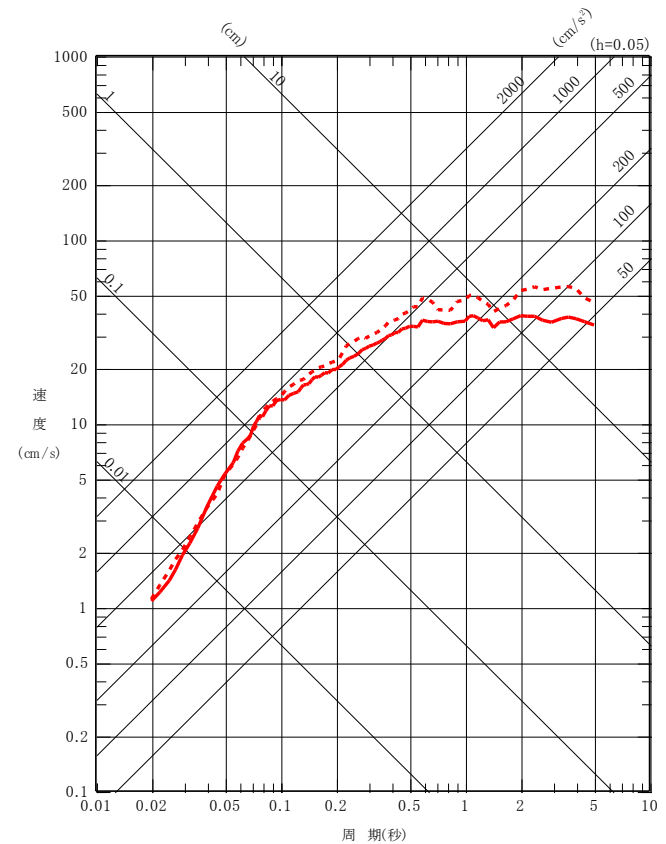
- 敷地において適切な内陸地殻内地震の観測記録が得られておらず、また、下北半島では他機関においても内陸地殻内地震震源近傍の大きな観測記録は得られていないことから、標準応答スペクトルに基づく地震動は一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果(標準応答スペクトルに基づく地震動A及びB)を採用する。標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果として応答スペクトルを示す。
- なお、審査ガイド(複数の方法による検討)を踏まえ、補足的な検討として、プレート間地震による観測記録の位相を用いた検討を行い、伝播特性及びサイト特性に起因する位相特性が模擬地震波策定に与える影響はないことを確認している。[参考資料(本資料p.61~p.65)参照]

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(水平)
- - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(水平)



水平方向

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(鉛直)
- - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(鉛直)

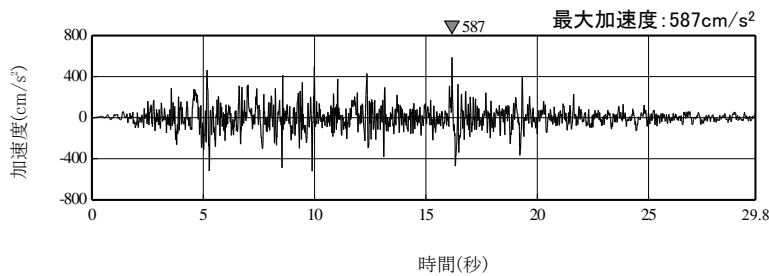


鉛直方向

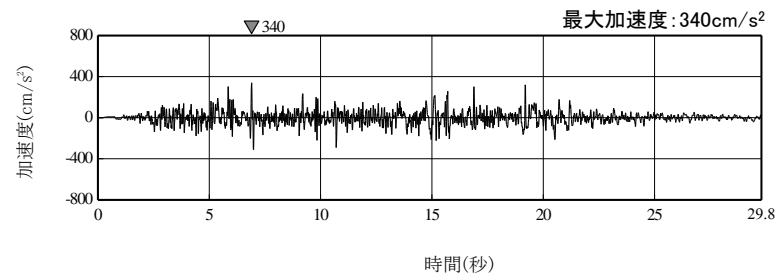
3.4 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果(加速度波形)

S227

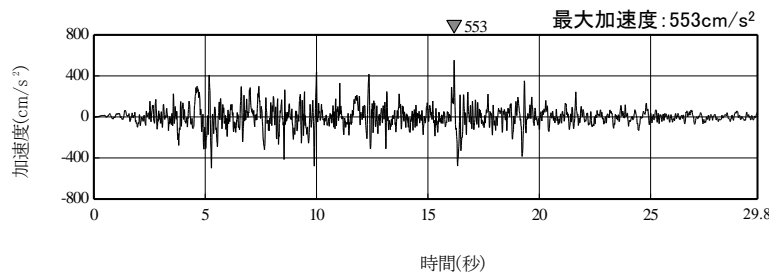
▶ 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価結果として加速度波形を示す。



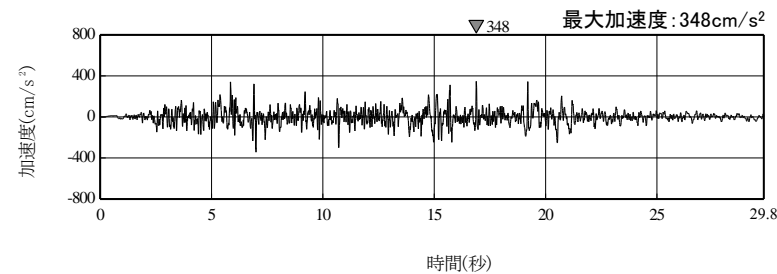
標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 水平)



標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 鉛直)



標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 水平)



標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 鉛直)

水平方向

鉛直方向

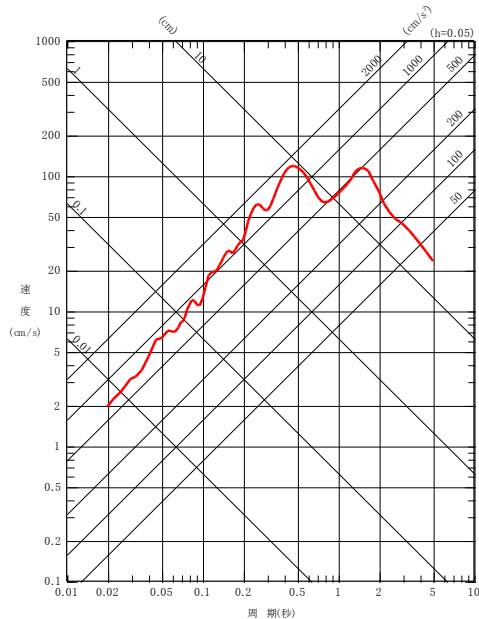
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価結果

4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価結果

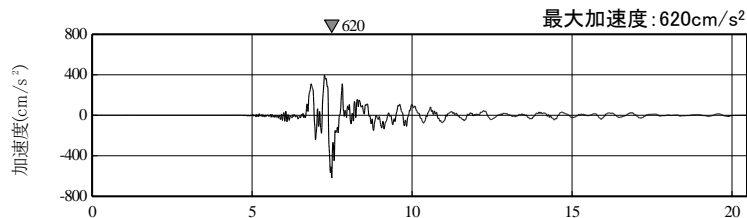
(1) 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動

- 全国共通に考慮すべき地震動のうち、2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動は以下のとおり設定する。参考として、内陸地殻内地震の評価結果との比較を参考資料(本資料p.69)に示す。

— : 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(水平)



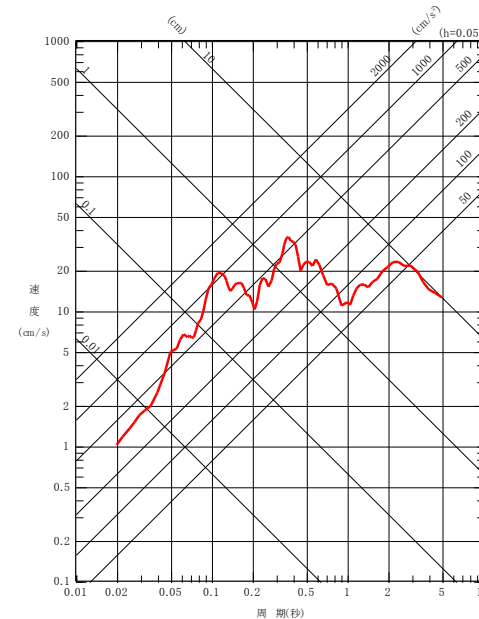
応答スペクトル(水平)



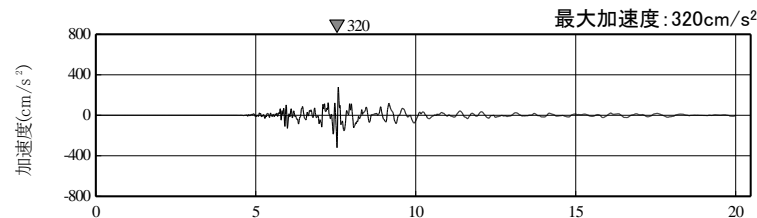
時間(秒)
加速度波形(水平)

水平方向

— : 2004年北海道留萌支庁南部の地震の知見に基づき設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(鉛直)



応答スペクトル(鉛直)



時間(秒)
加速度波形(鉛直)

鉛直方向

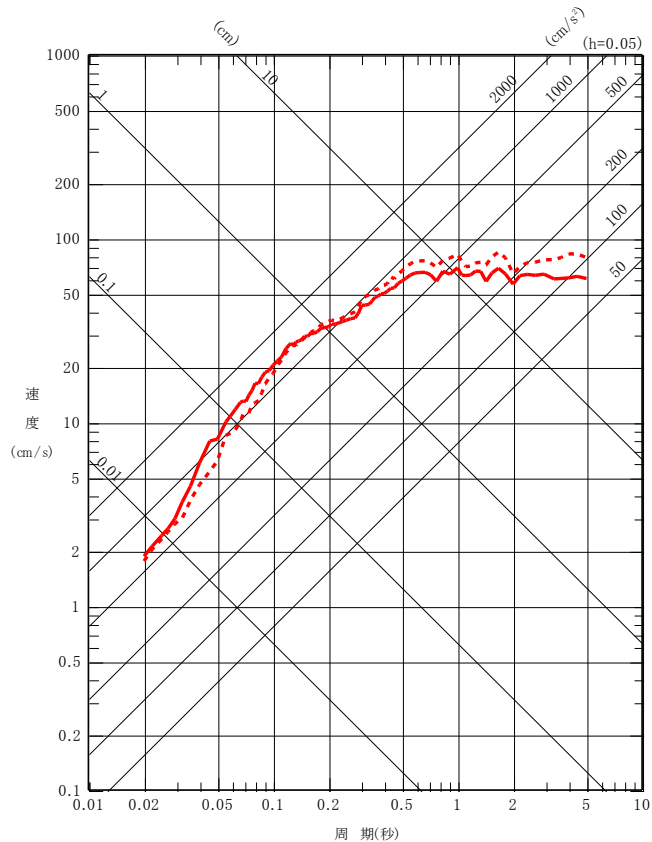
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価結果

(2) 標準応答スペクトルに基づく地震動(応答スペクトル)

S227

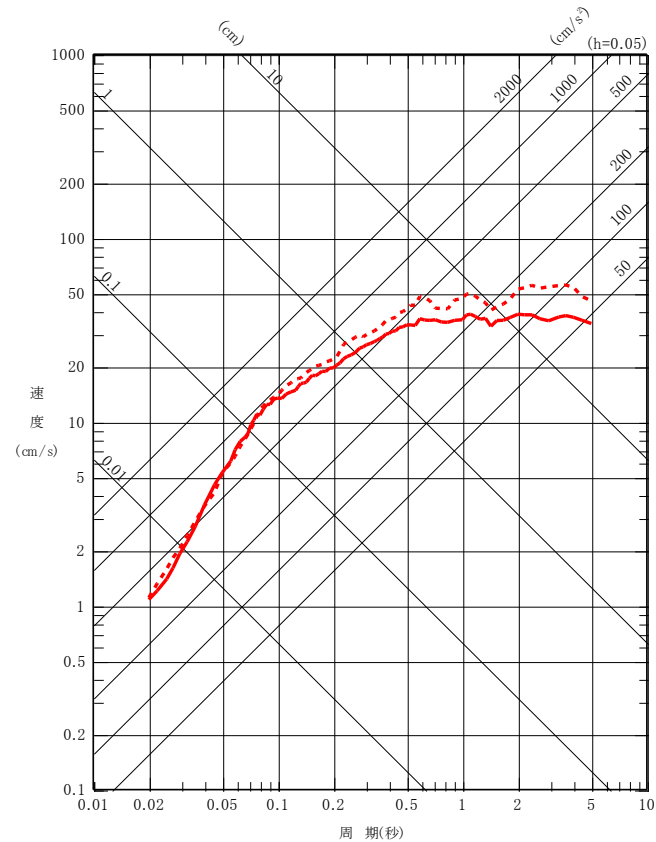
- 全国共通に考慮すべき地震動のうち、標準応答スペクトルに基づく地震動の応答スペクトルを以下のとおり設定する。参考として、内陸地殻内地震の評価結果との比較を参考資料(本資料p.69)に示す。

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(水平)
- - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(水平)



水平方向

— : 標準応答スペクトルに基づく地震動A(鉛直)
- - : 標準応答スペクトルに基づく地震動B(鉛直)



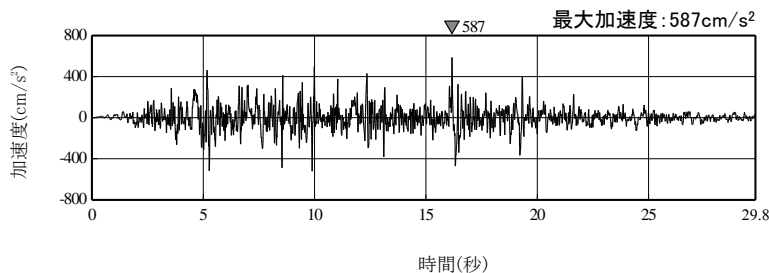
鉛直方向

4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価結果

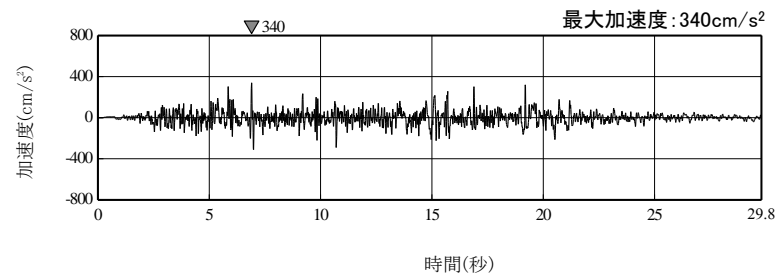
(2) 標準応答スペクトルに基づく地震動(加速度波形)

S227

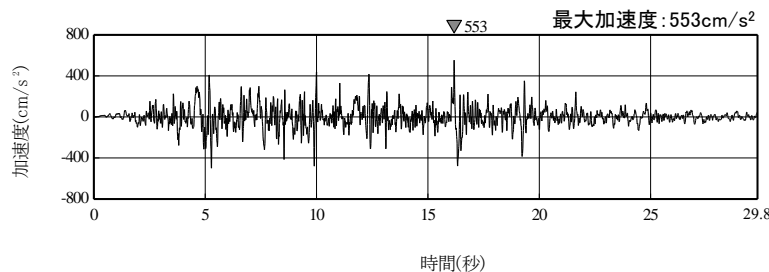
➤ 全国共通に考慮すべき地震動のうち、標準応答スペクトルに基づく地震動の加速度波形を以下のとおり設定する。



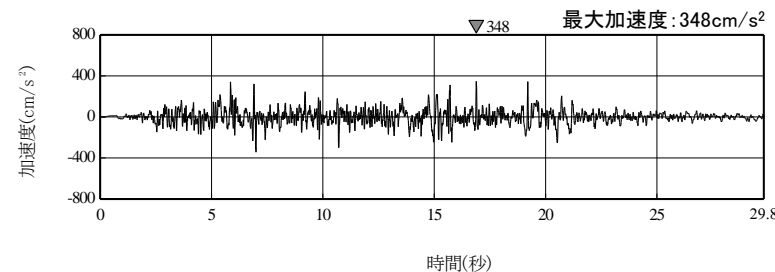
標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 水平)



標準応答スペクトルに基づく地震動A
(T.P.-282.8m入力, 鉛直)



標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 水平)



標準応答スペクトルに基づく地震動B
(T.P.-2987.8m入力, 鉛直)

水平方向

鉛直方向

參考資料

参考資料

(1) 標準応答スペクトルと加藤ほか(2004)による応答スペクトルの比較

- 地震基盤相当面($V_s=2200\text{m/s}$ 以上)で定義された標準応答スペクトルは、 $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4200\text{m/s}$ における加藤ほか(2004)による応答スペクトルを上回っていることから、加藤ほか(2004)による応答スペクトルは採用しない。(左図)
- なお、加藤ほか(2004)による応答スペクトルの場合、 V_s 、 V_p の値によって応答スペクトルの大きさを経験的に補正する手法を採用しているため、東通原子力発電所の解放基盤表面の振動特性を代表する位置における加藤ほか(2004)による応答スペクトルは、標準応答スペクトルに基づき地下構造の影響を精査し評価した地震動を鉛直方向の長周期側で上回るものの、2014年6月に申請した基準地震動 S_s-1 を超過しないことから、加藤ほか(2004)による応答スペクトルの評価は、保安水準の確保の観点からも特に必要とはならない。(右図)

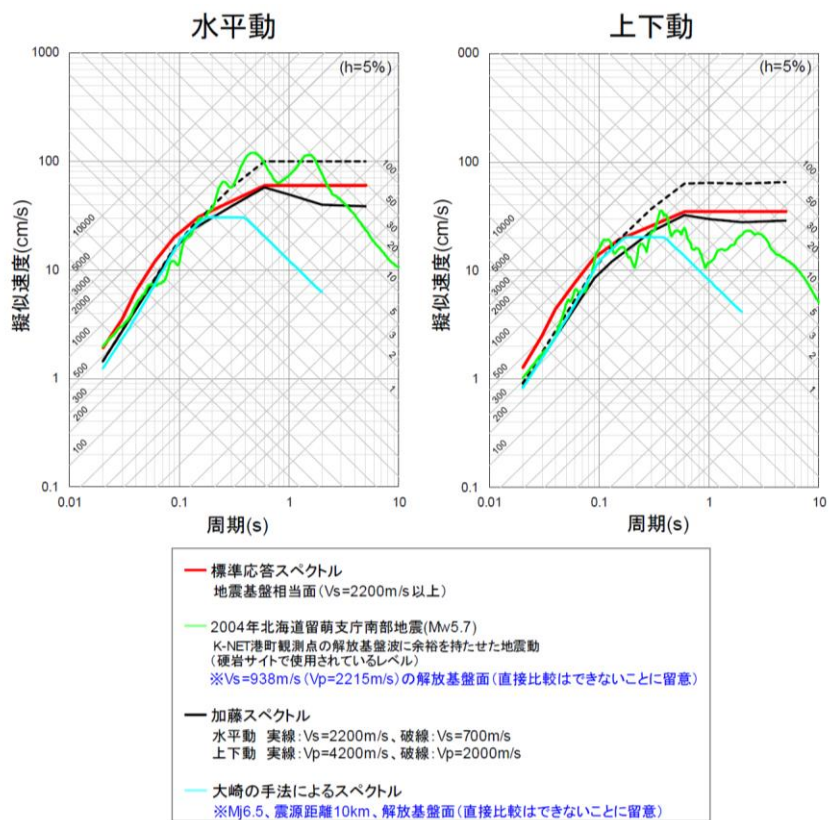
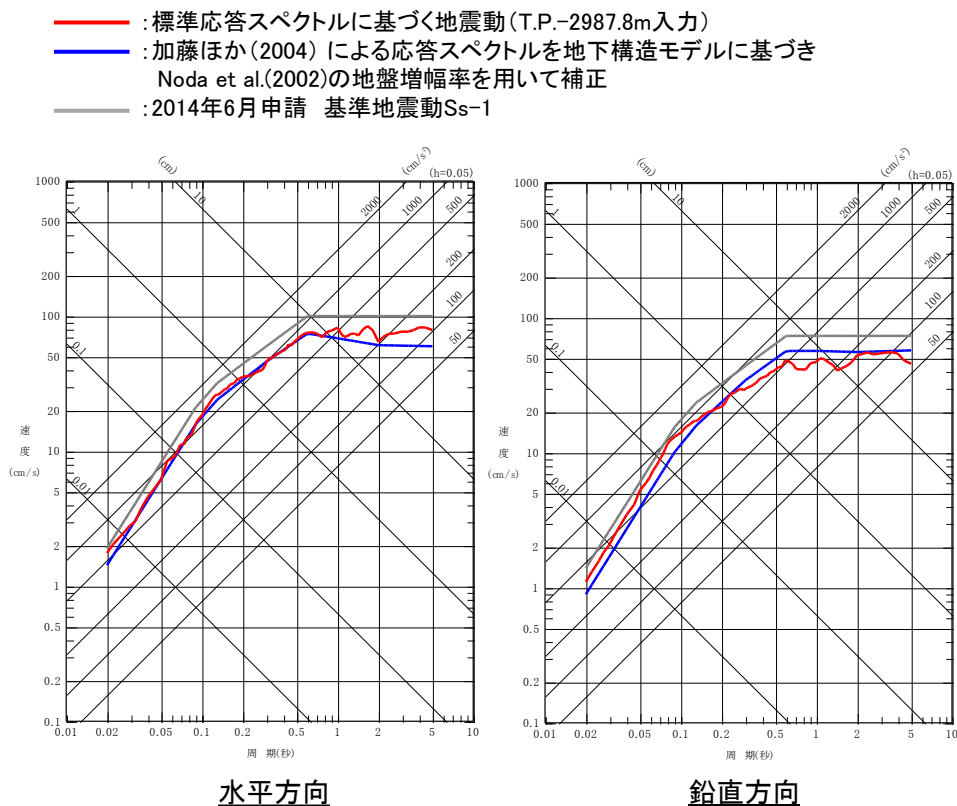


図 2.5 標準応答スペクトルと審査関連の地震動レベルの比較



東通原子力発電所の解放基盤表面の振動特性を代表する位置における応答スペクトルの比較

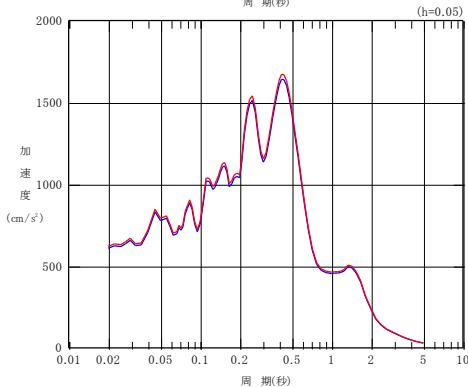
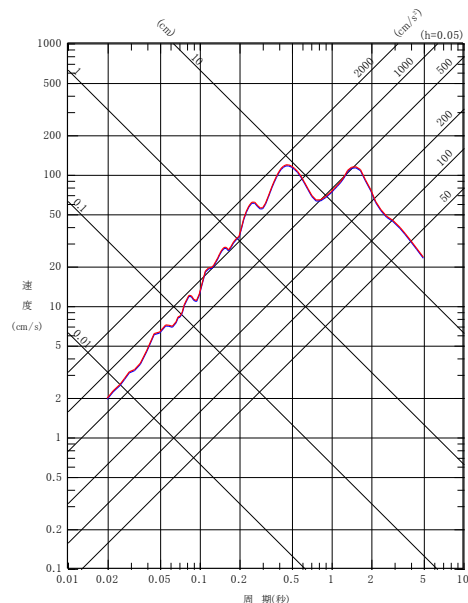
(2)2004年北海道留萌支庁南部の地震

基盤地震動の評価結果と「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動の比較

➤ 2004年北海道留萌支庁南部の地震の基盤地震動の評価結果(水平:609cm/s², 鉛直:306cm/s²)と, 更なる保守性を考慮し設定した「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(水平:620cm/s², 鉛直:320cm/s²)を比較して示す。

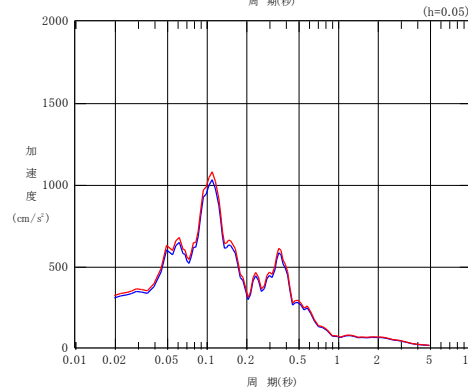
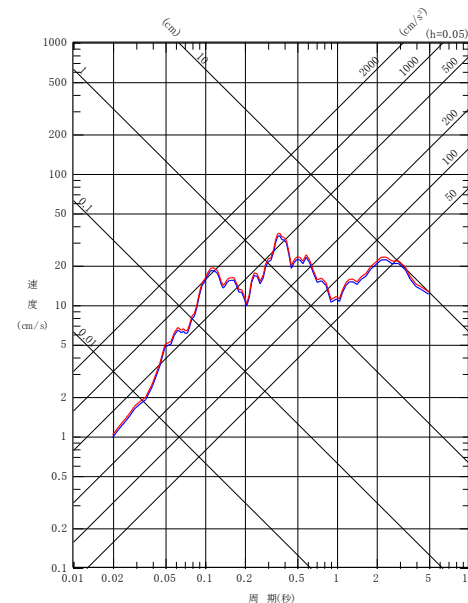
— : 基盤地震動の評価結果(水平:609cm/s²)
— : 「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(水平:620cm/s²)

— : 基盤地震動の評価結果(鉛直:306cm/s²)
— : 「震源を特定せず策定する地震動」に考慮する地震動(鉛直:320cm/s²)



応答スペクトル(水平)

水平方向



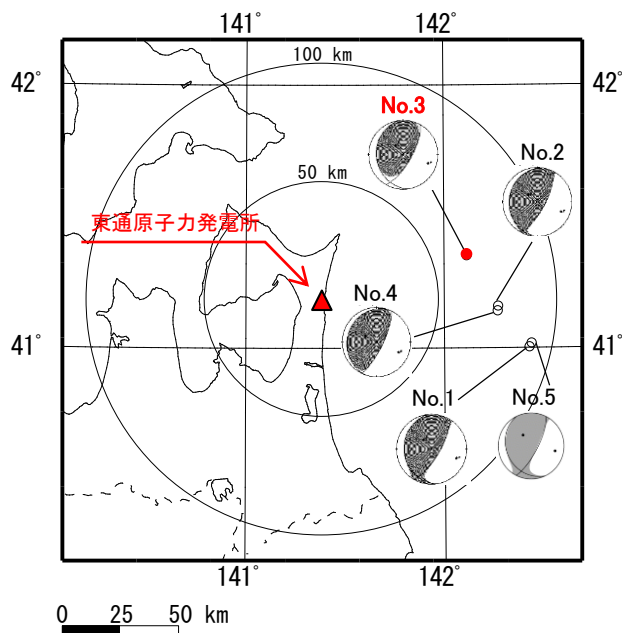
応答スペクトル(鉛直)

鉛直方向

(3)プレート間地震による観測記録を用いた補足検討

①検討目的, 検討に用いる地震の選定

- 敷地で適切な内陸地殻内地震の観測記録が得られていないが、伝播特性及びサイト特性に起因する位相特性が模擬地震波策定に与える影響を確認するため、プレート間地震による観測記録の位相を用いた検討を行う。
- 青森県東方沖ではM6クラスのプレート間地震が発生している。規模の大きい地震を対象とすることは観測記録の長周期成分の信頼性を確保できる。また、継続時間が長いため目標スペクトルに適合する模擬地震波を作成しやすい利点がある。
- 震央距離100km以内、地震規模M6以上の検索条件で、5地震のプレート間地震が抽出された。
- 模擬地震波作成には、観測記録の位相特性に含まれる断層の破壊過程の影響を重視し、震源距離が最も近い2012年5月24日の青森県東方沖の地震(M6.1)の観測記録を用いる。



抽出された5地震の諸元

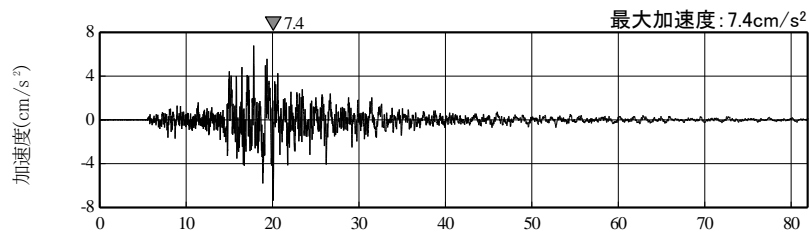
No.	年	月	日	時	分	東経		北緯		M	震源 深さ (km)	震央 距離 (km)	震源 距離 (km)	最大 加速度 (cm/s ²)
						(°)	(')	(°)	(')					
1	2001	8	14	5	11	142	26.19	40	59.73	6.4	37.69	90	98	5.1
2	2002	10	14	23	12	142	16.85	41	9.11	6.1	52.71	75	92	5.4
3	2012	5	24	0	2	142	7.42	41	20.62	6.1	59.6	64	88	7.4
4	2014	8	10	12	43	142	16.74	41	8.04	6.1	50.56	75	90	4.2
5	2018	1	24	19	51	142	26.88	41	0.58	6.3	33.9	91	97	5.1

敷地周辺のプレート間地震(M6以上)の
観測地震の震央分布
(震央:気象庁, 震源メカニズム解:F-net)

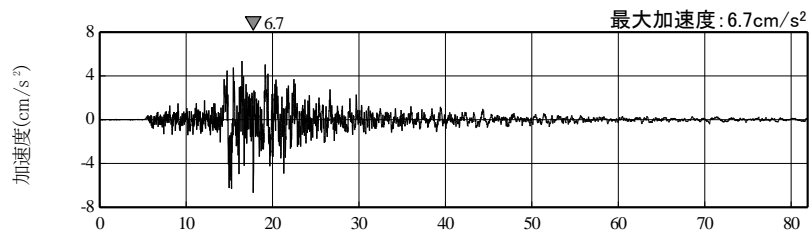
(3)プレート間地震による観測記録を用いた補足検討

②検討に用いる地震観測記録

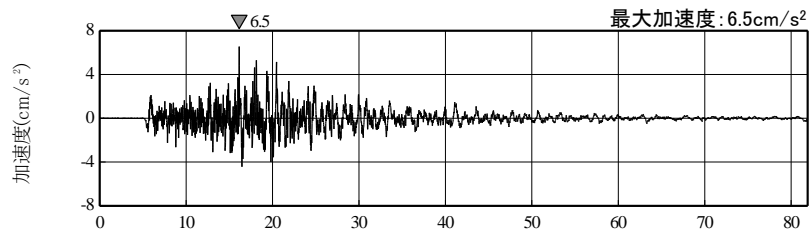
▶ 模擬地震波の作成に用いる2012年5月24日の青森県東方沖の地震(M6.1)の観測記録(T.P.-282.8m)の加速度波形及び応答スペクトルを示す。なお、水平方向については、NS成分とEW成分に大きな差異がないことから、最大加速度が大きいNS成分を採用する。



時間(秒)
NS成分



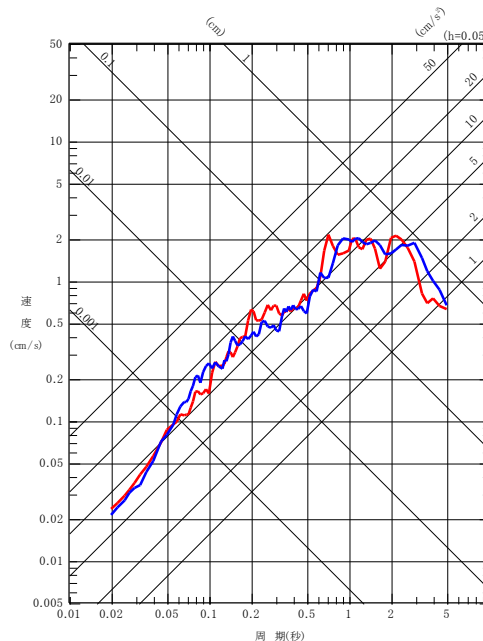
時間(秒)
EW成分



時間(秒)
UD成分

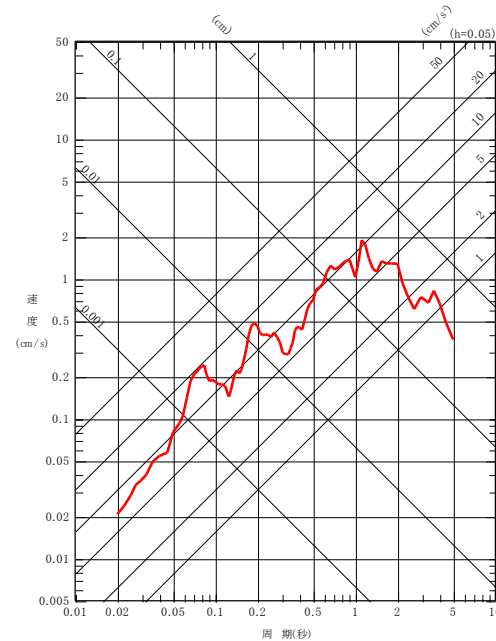
観測記録(T.P.-282.8m) 加速度波形

— : NS成分
— : EW成分



水平方向

— : UD成分



鉛直方向

観測記録(T.P.-282.8m) 応答スペクトル

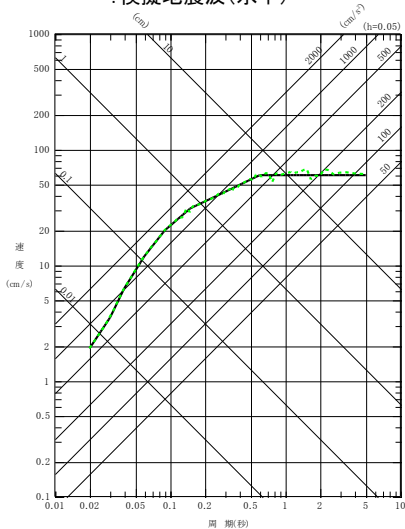
(3)プレート間地震による観測記録を用いた補足検討

③模擬地震波の作成結果

▶ 模擬地震波は、観測記録の位相特性を用い目標スペクトルと適合※するようにフーリエ振幅を修正することにより作成した。

※:適合度は、一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する模擬地震波と同じく、原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-2015(日本電気協会, 2016)に基づき判定(p.43参照)。

— :標準応答スペクトル(目標スペクトル)(水平)
- - - :模擬地震波(水平)

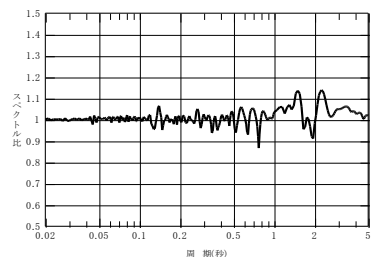


標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル(水平)

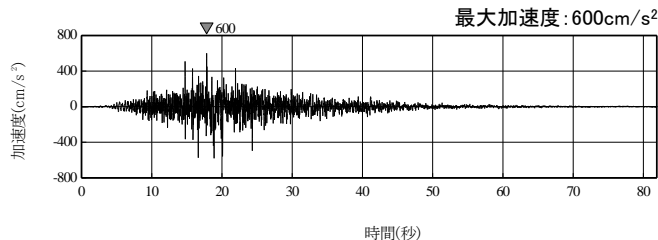
適合度(水平)

① 応答スペクトル 最小比	0.87
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.04

— : 応答スペクトル比(水平)
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



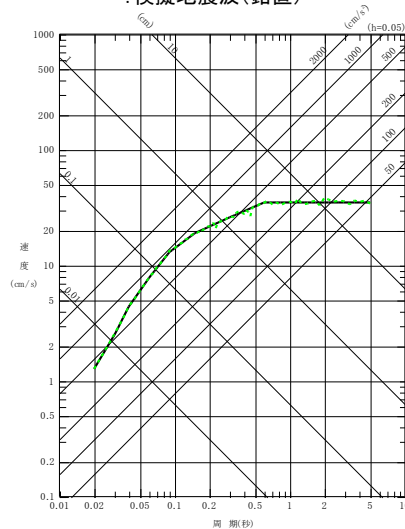
標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比(水平)



時間(秒)
加速度波形(水平)

水平方向

— :標準応答スペクトル(目標スペクトル)(鉛直)
- - - :模擬地震波(鉛直)

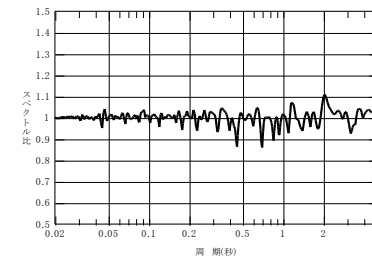


標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル(鉛直)

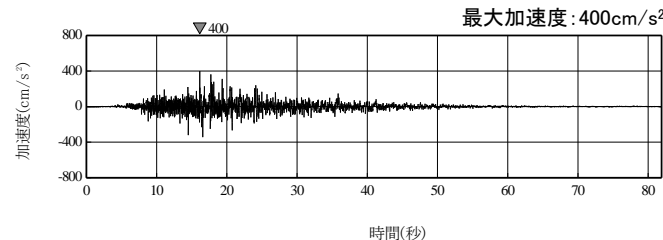
適合度(鉛直)

① 応答スペクトル 最小比	0.86
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.01

— : 応答スペクトル比(鉛直)
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比(鉛直)



時間(秒)

加速度波形(鉛直)

鉛直方向

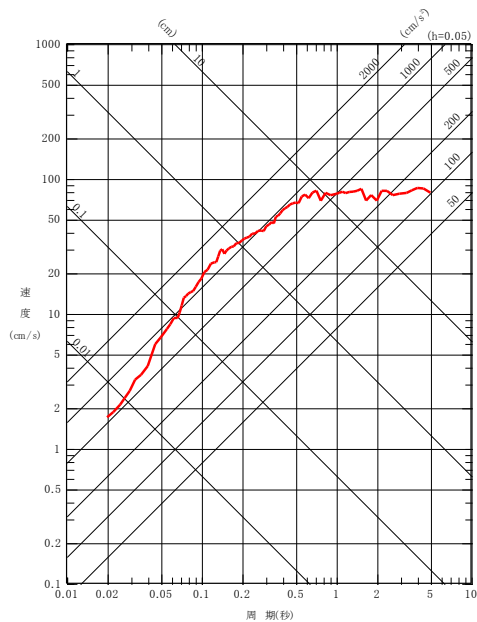
観測記録の位相特性を用いた地震基盤位置における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波

(3)プレート間地震による観測記録を用いた補足検討

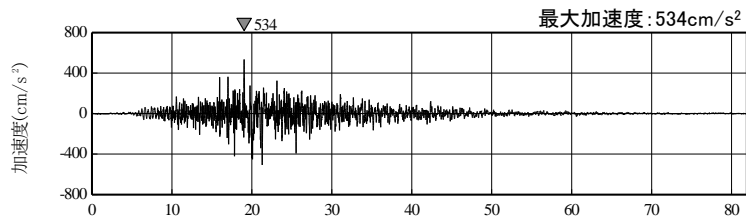
④解放基盤表面における地震動の評価結果

➤ 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(観測記録位相)を地下構造モデルを用いて、T.P.-2987.8mを入力位置とした場合の解放基盤表面位置($V_s=1300\text{m/s}$)に引き上げた地震動について、応答スペクトル及び加速度波形を示す。

— :解放基盤表面位置に引き上げた地震動(水平)



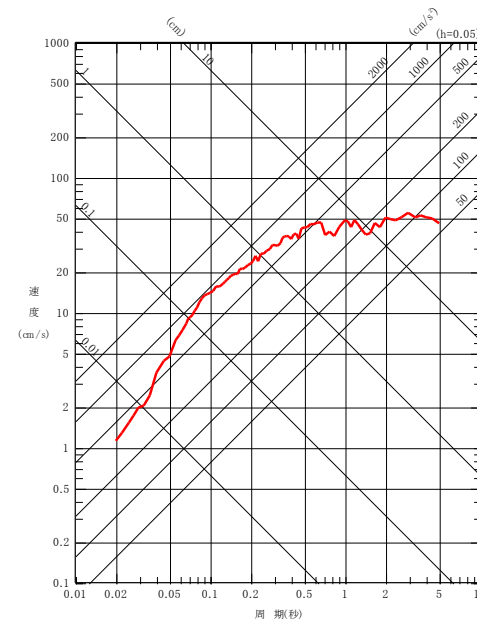
応答スペクトル(水平)



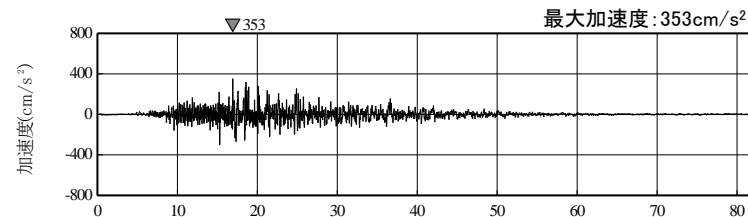
加速度波形(水平)

水平方向

— :解放基盤表面位置に引き上げた地震動(鉛直)



応答スペクトル(鉛直)



加速度波形(鉛直)

鉛直方向

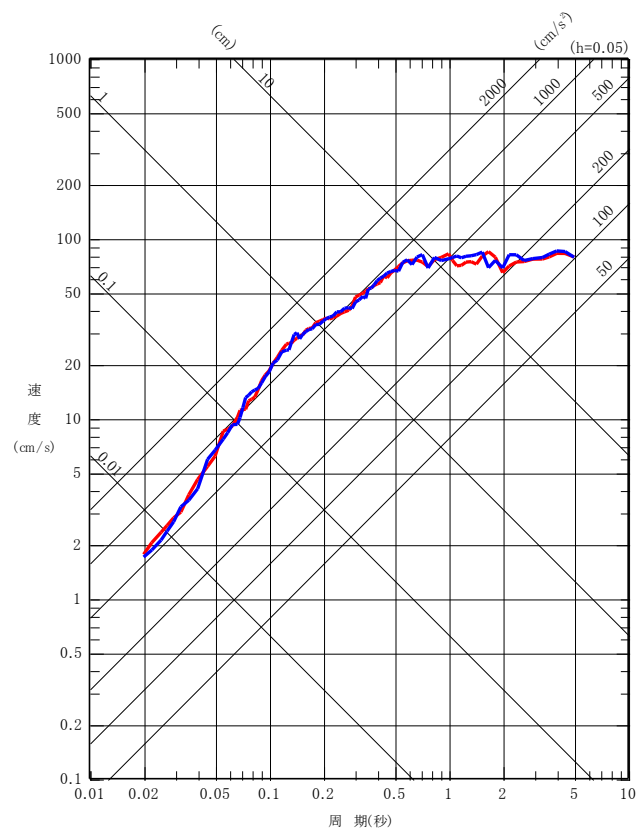
(3)プレート間地震による観測記録を用いた補足検討

⑤一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果との比較

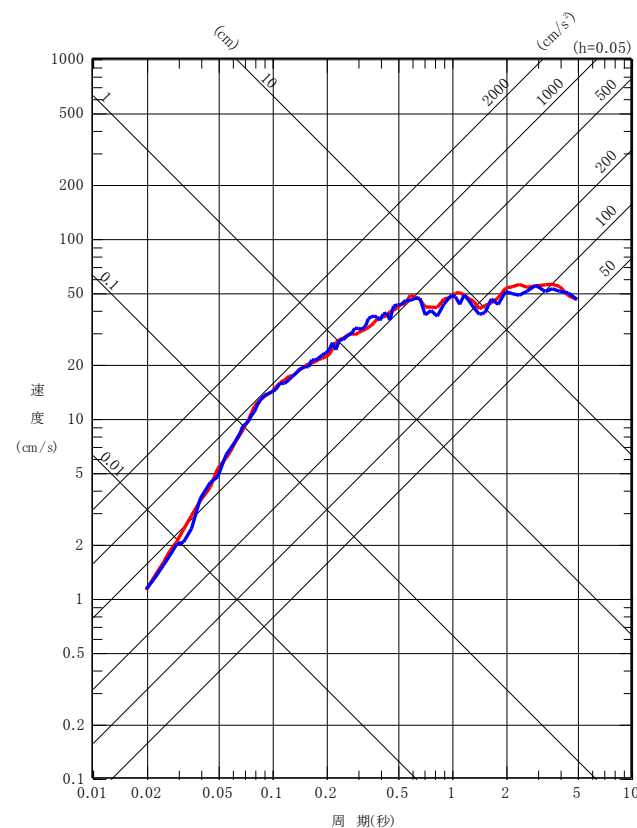
➤ それぞれの方法で評価したT.P.-2987.8mを入力位置とした場合の解放基盤表面における地震動の応答スペクトルは、全周期にわたってほぼ同じ大きさを示すものとなった。これは、今回のプレート間地震による観測記録の位相特性を用いた模擬地震波には、伝播特性及びサイト特性に起因する特殊な位相特性が含まれていないことを間接的に示していると考えられる。

— : 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果(水平)
— : 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果(水平)

— : 一様乱数の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果(鉛直)
— : 観測記録の位相特性を用いた模擬地震波による評価結果(鉛直)



水平方向



鉛直方向

余 白

参考資料

(4)各入力位置による解放基盤表面における地震動 ①

S227

- ▶ 一様乱数の位相特性を用いた標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(水平方向, 鉛直方向)について, 地下構造モデルのT.P.-282.8m以深の5箇所を入力位置とした場合の解放基盤表面(解放基盤表面の振動特性を代表する位置)における地震動を評価した結果の応答スペクトルを次頁に示す。
- ▶ 短周期側はT.P.-282.8mを入力位置とした評価結果が大きく※, 中～長周期側はT.P.-2987.8mを入力位置とした評価結果が大きい。

※: T.P.-574.8mを入力位置とした結果は, T.P.-282.8mを入力位置とした結果を部分的に上回るが, その差は模擬地震波のフィッティング範囲内の違いである。なお, 基準地震動の策定において, これら全ての応答スペクトルと基準地震動の比較を参考に行う。

地盤補正に用いる地下構造モデル

T.P. (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Qs	Qp
+2.0	—	—	—	—	—	—
-7.0	9.0	2.24	1300	2250	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}
-62.0	55.0	2.24	1790	3060	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}
-82.8	20.8	2.72	1800	3340	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}
-106.0	23.2	2.72	1800	3340	1.23f ^{0.74}	2.33f ^{0.50}
-166.0	60.0	2.30	1910	3350	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}
-190.0	24.0	2.30	2030	3360	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}
-252.0	62.0	2.30	2100	3390	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}
-282.8	30.8	2.33	2090	3690	8.91f ^{0.94}	5.55f ^{0.50}
-574.8	292.0	2.44	2390	3690	100	100
-1495.8	921.0	2.45	2460	3750	100	100
-2441.8	946.0	2.48	2590	3960	100	100
-2441.8	546.0	2.50	2680	4160	100	100
-2987.8	∞	2.63	3340	5800	150	150

解放基盤表面の振動特性を代表する位置

入力位置

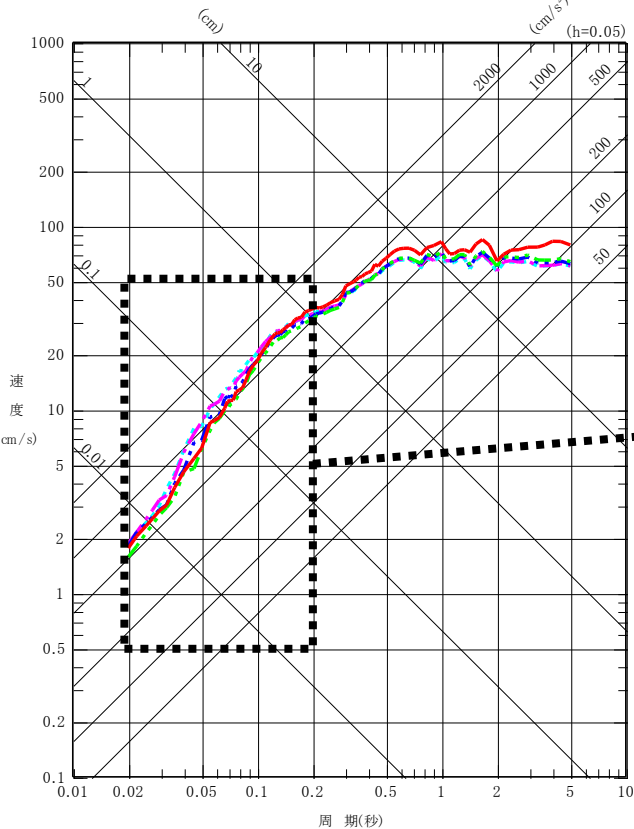
参考資料

(4)各入力位置による解放基盤表面における地震動 ②

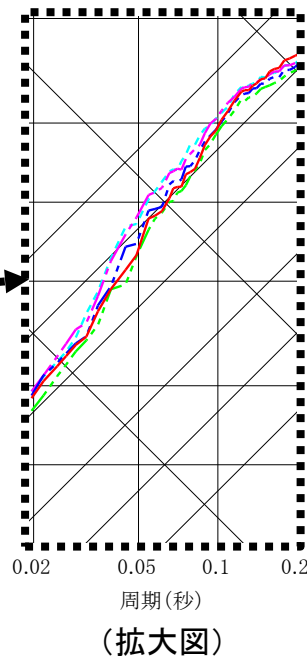
S227

- : T.P.-282.8m (Vs=2390m/s) 位置に入力※
- : T.P.-574.8m (Vs=2460m/s) 位置に入力※
- : T.P.-1495.8m (Vs=2590m/s) 位置に入力
- : T.P.-2441.8m (Vs=2680m/s) 位置に入力
- : T.P.-2987.8m (Vs=3340m/s) 位置に入力

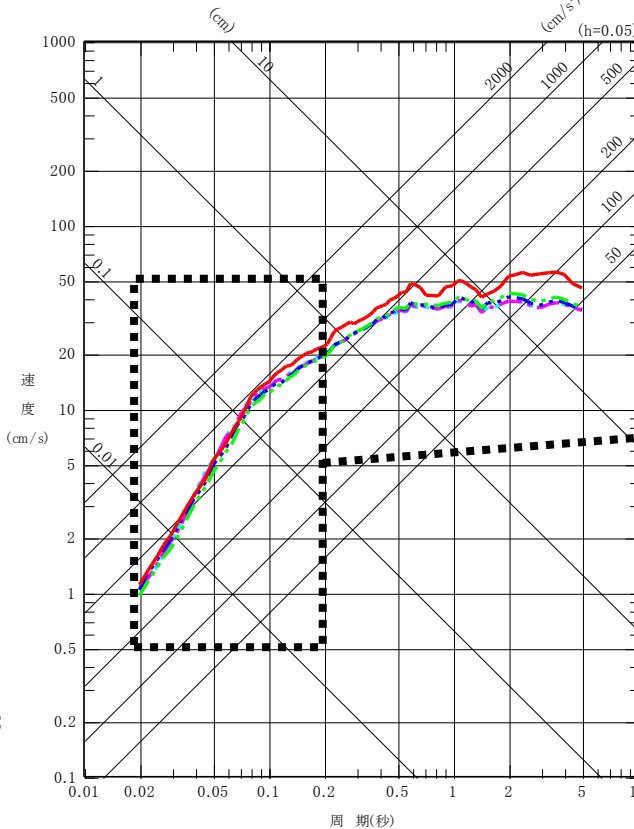
- : T.P.-282.8m (Vp=3690m/s) 位置に入力※
- : T.P.-574.8m (Vp=3750m/s) 位置に入力※
- : T.P.-1495.8m (Vp=3960m/s) 位置に入力
- : T.P.-2441.8m (Vp=4160m/s) 位置に入力
- : T.P.-2987.8m (Vp=5800m/s) 位置に入力



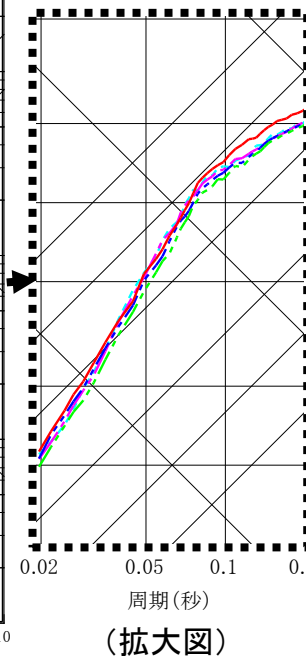
水平方向



(拡大図)



鉛直方向



(拡大図)

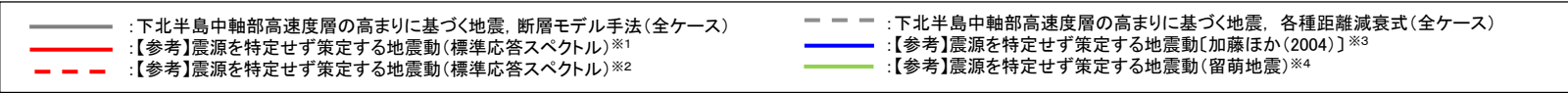
各入力位置による解放基盤表面における地震動(応答スペクトル)

※:高振動数側(20Hz以上)にフィルター処理を実施。(ゆがみ除去)

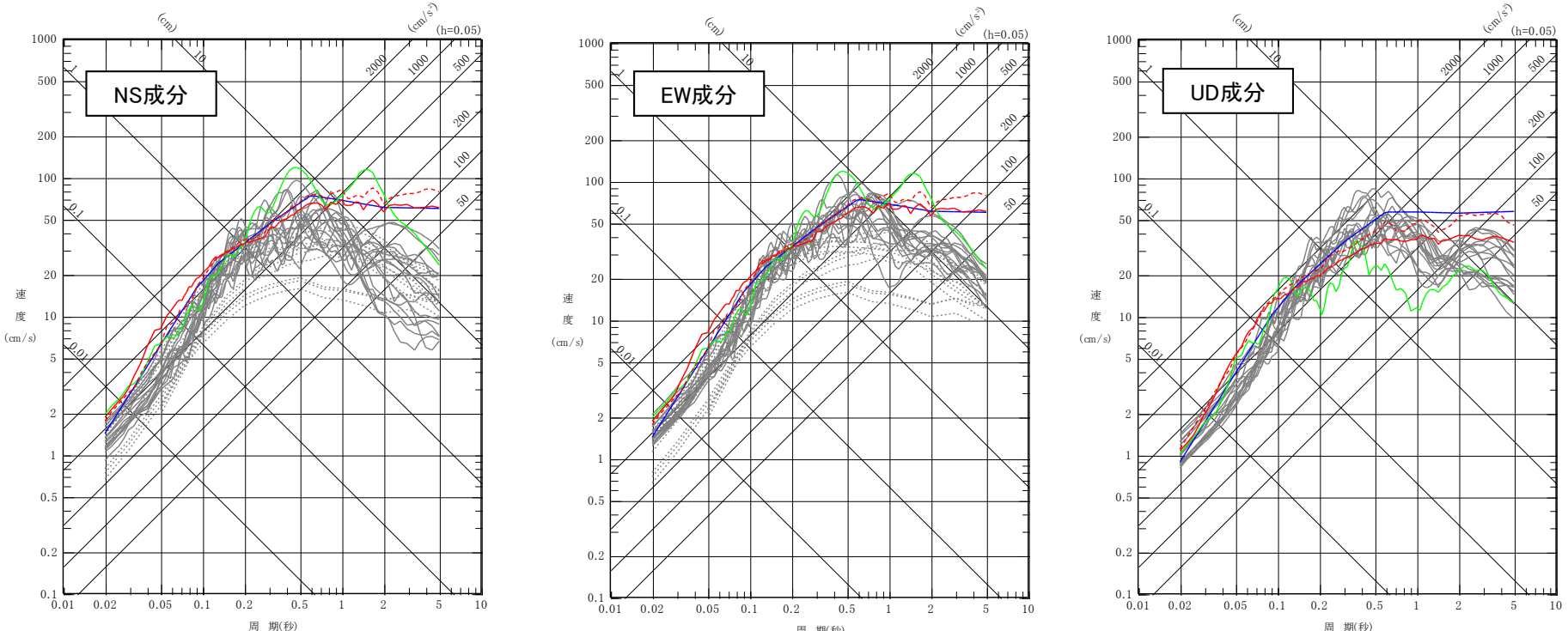
(5)全国共通に考慮すべき地震動の評価結果と

内陸地殻内地震「下北半島中軸部高速度層の高まりに基づく地震」の比較

- 「下北半島中軸部高速度層の高まりに基づく地震」は、活断層を伴わない規模の小さい地震をベースに想定位置や規模等に保守性を考慮した検討用地震である。そこで、参考として敷地において算定された地震動が保守的なものであることを確認する観点から、「震源を特定せず策定する地震動」との比較を行った。比較には、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録に基づき策定された標準応答スペクトル^{※1, 2}及び加藤ほか(2004)^{※3}に加え留萌地震^{※4}を採用した。
- 「下北半島中軸部高速度層の高まりに基づく地震」は、短周期～中周期にかけて「震源を特定せず策定する地震動」を超過する大きさとなっている。



※1: 標準応答スペクトルに基づく地震動A(本資料p.56)。
 ※2: 標準応答スペクトルに基づく地震動B(本資料p.56)。
 ※3: 地下構造モデルに基づきNoda et al.(2002)の地盤増幅率を用いて補正した。
 ※4: 2004年北海道留萌支庁南部の地震の評価結果(本資料p.55)。



「下北半島中軸部高速度層の高まりに基づく地震」の地震動評価と「震源を特定せず策定する地震動」の比較

参考文献(1)

1. 検討方針

1. 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, 2013年12月

2. 2004年北海道留萌支庁南部の地震における基盤地震動の知見を用いた評価

1. 気象庁報道発表資料(2004.12.14):平成16年12月14日 16時00分 2004年12月14日14時56分の留萌支庁南部の地震について
2. 気象庁報道発表資料(2005.1.11):平成17年1月11日 平成16年12月の地震活動及び火山活動について
3. 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2005.1.12):平成17年1月12日 2004年12月の地震活動の評価 12月14日留萌支庁南部の地震, <http://jishin.go.jp/main/chousa/05jan/p04.htm>
4. 司宏俊, 翠川三郎(1999):断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
5. 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, 2013年12月
6. 笹谷努, 前田宜浩, 高井伸雄, 重藤迪子, 堀田淳, 関克郎, 野本真吾(2008):Mj6.1内陸地殻内地震によって大加速度を観測したK-NET(HKD020)地点でのS波速度構造の推定, 物理探査学会第119回学術講演会講演論文集, 25-27.
7. 狐崎長琅, 後藤典敏, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 斉藤徳美, 黒田徹, 山根一修, 奥住宏一(1990):地震動予測のための深層地盤P・S波速度の推定, 自然科学災害, 9-3, 1-17.
8. 加藤研一, 宮腰勝義, 武村雅之, 井上大栄, 上田圭一, 壇一男(2004):震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル - 地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討 -, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 46-86.
9. 佐藤浩章, 芝良昭, 東貞成, 功刀卓, 前田宜浩, 藤原 広行(2013.10):M6クラスの内陸地殻内地震による強震記録の要因解明に向けたK-NET (HKD020)港町観測点での物理探査, 物理探査学会第129回学術講演会講演論文集, 35-38.

3. 標準応答スペクトルに基づく地震動の評価

1. 日本電気協会(2016):原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015
2. 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
3. 武村雅之(1990):日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 第2輯 第43巻
4. Kanamori H. (1977):The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research Vol.82 No.20
5. 気象庁:地震月報(カタログ編), <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>
6. 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net:地震のメカニズム情報, <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>

(参考資料)

1. 加藤研一, 宮腰勝義, 武村雅之, 井上大栄, 上田圭一, 壇一男(2004):震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル - 地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討 -, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 46-86.
2. 原子力規制委員会 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム: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, 2019年8月7日
3. 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

参考文献(2)

(参考資料)

4. 気象庁:地震月報(カタログ編), <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>
5. 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net:地震のメカニズム情報, <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>