

| | |
|--------------|---------------|
| 大間原子力発電所審査資料 | |
| 資料番号 | OM1-CA163-R01 |
| 提出年月日 | 2022年3月7日 |

大間原子力発電所

震源を特定せず策定する地震動のうち全国共通に考慮すべき地震動の評価について

2022年3月

電源開発株式会社

大間原子力発電所

震源を特定せず策定する地震動のうち 全国共通に考慮すべき地震動の評価について

2022年3月7日
電源開発株式会社

○ 「第615回審査会合」及び「第646回審査会合」での資料の誤りに関わる対応を踏まえ、本資料にて過去の審査会合資料を引用する際の注記を下記のとおりとする。

・ 右上の注記

再掲：過去の審査会合資料を、そのまま引用する場合

一部修正：過去の審査会合資料の内容を、一部修正する場合

誤りを修正：過去の審査会合資料の誤りを、正しい記載とする場合

・ 左下の注記

修正した誤りの内容を記載（誤りの修正がある場合）

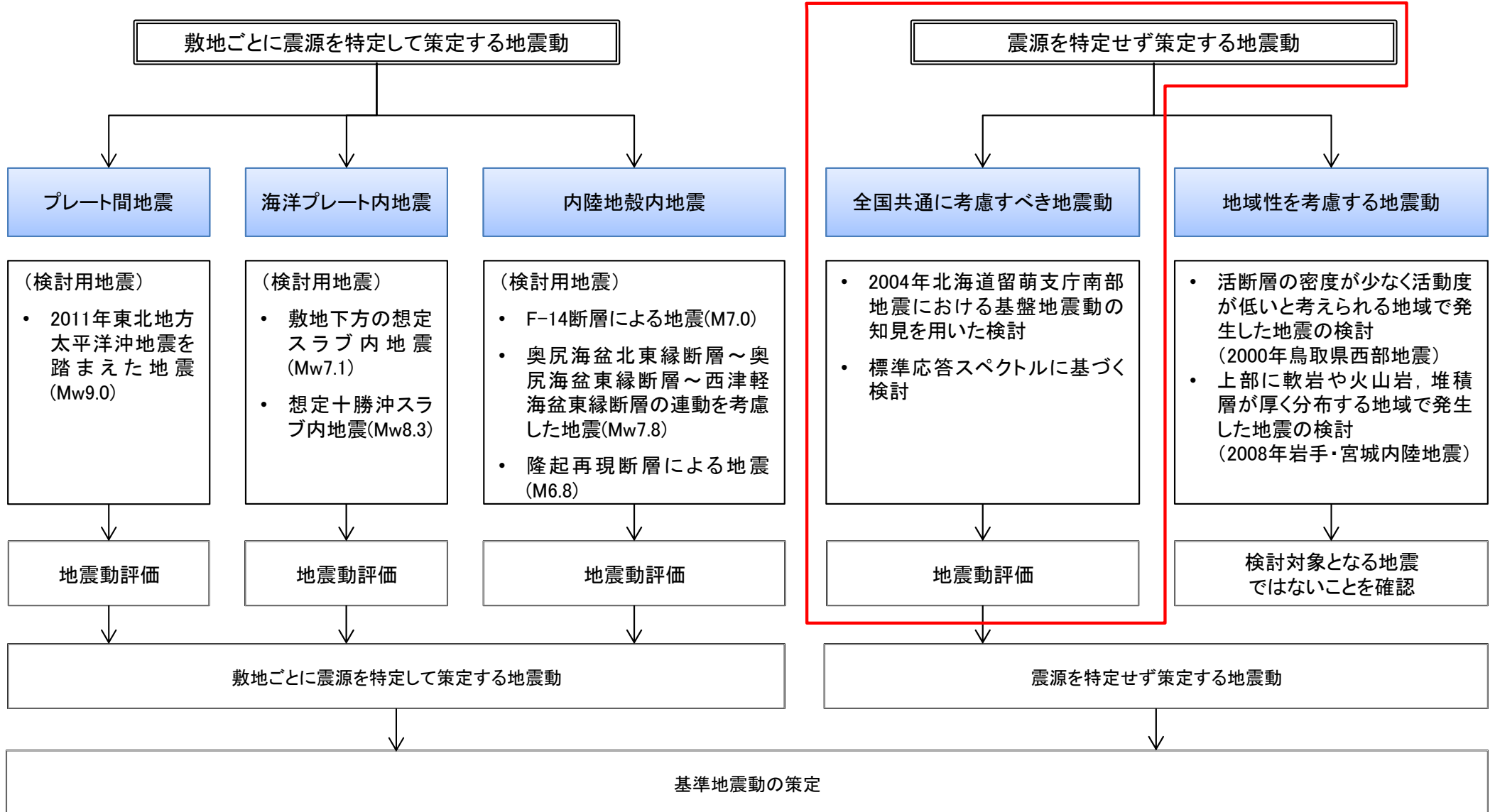
| | |
|--|------|
| 1. はじめに | P.2 |
| 1.1 基準地震動策定の全体フロー | P.2 |
| 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点 | P.3 |
| 2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要 | P.4 |
| 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針 | P.5 |
| 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー | P.6 |
| 3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価 | P.7 |
| 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討 | P.9 |
| 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 | P.11 |
| 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 | P.16 |
| 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 | P.23 |
| 3.1.4 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 | P.42 |
| 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 | P.43 |
| 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動 | P.52 |
| 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討 | P.53 |
| 3.2.1 標準応答スペクトル | P.55 |
| 3.2.2 評価方針 | P.56 |
| 3.2.3 模擬地震波の作成 | P.58 |
| 3.2.4 代表波の選定 | P.65 |
| 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動 | P.69 |
| 4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ | P.70 |
| 補足説明資料 | P.75 |
| (補足1)模擬地震波による解放基盤表面における地震動について | P.77 |
| (補足2)検討に用いる地震観測記録の選定 | P.81 |
| 参考資料 | P.84 |
| (参考1)エネルギースペクトルを指標とした比較 | P.86 |
| (参考2)「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ | P.89 |
| (参考3)2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動 | P.90 |



本資料における説明範囲

・本資料において、「震源を特定せず策定する地震動」の評価のうち、「全国共通に考慮すべき地震動の評価」について説明する。

本資料における説明範囲



全国共通に考慮すべき地震動の評価に関する主な変更点

【2014年12月変更申請】

- 敷地周辺の地域特性を踏まえて想定される「震源を特定しない地震」の規模を踏まえた上で、以下の知見を考慮。
 - 国内外における震源近傍の地震観測記録に基づく「震源を事前に特定できない地震による水平動の上限レベルの応答スペクトル」として「加藤ほか(2004)の応答スペクトル」を考慮。
 - 2004年北海道留萌支庁南部の地震の観測記録に関する知見として「佐藤ほか(2013)の基盤地震動」を考慮。

【2014年12月変更申請時からの主な変更点】

- 2021年4月に改正された「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」等を踏まえ、「標準応答スペクトル」を考慮した地震動の評価を行った。(2021年10月補正申請済み)
(一様乱數位相を用いた模擬地震波の作成に関して、振幅包絡線の設定におけるMの値について、2021年10月補正申請においてM6.9としているが、先行地点の審査を踏まえ、保守性の観点からM7.0とした評価結果を示す予定。)
- 2004年北海道留萌支庁南部の地震の観測記録に関する知見として評価に用いた「佐藤ほか(2013)の基盤地震動」に対して、2014年12月変更申請後に得られたあらたな知見や審査動向を反映するとともに、深部地下構造モデルの、解放基盤表面における地震動を評価する位置(基盤の地震動を評価する位置)の地盤物性を加味して、評価を見直した。
- なお、2014年12月変更申請時に考慮していた「加藤ほか(2004)の応答スペクトル」については、「標準応答スペクトル」がこれを上回る地震動レベルとして策定されていることから、震源を特定せず策定する地震動として考慮しない。

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動



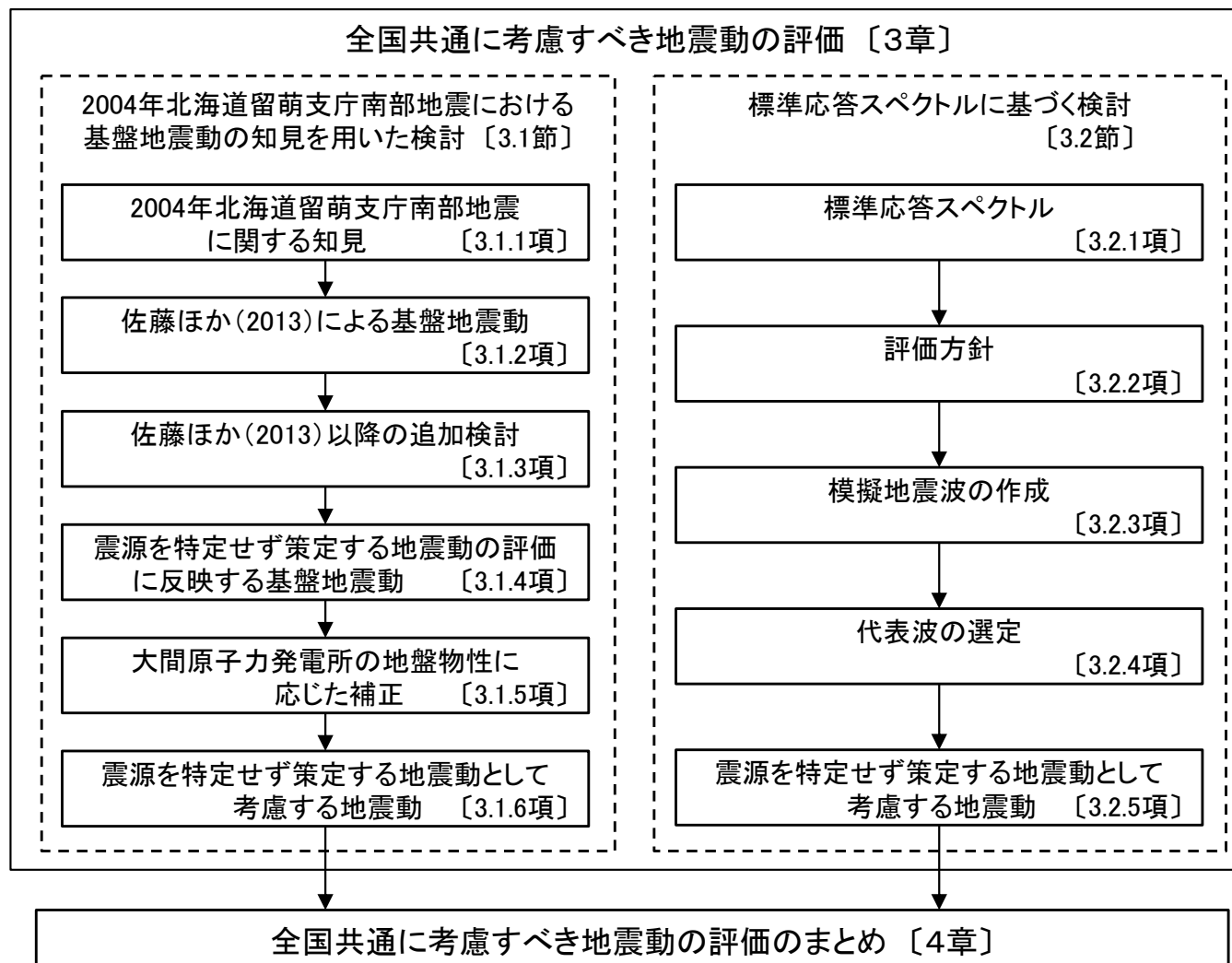
全国共通に考慮すべき地震動の検討方針

- 敷地における震源を特定せず策定する地震動は、「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」の別記2において、『「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連付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を基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること。』とされていること、及び審査ガイドの記載を踏まえて策定する。

| | 審査ガイド等の記載 | 大間原子力発電所における検討 |
|---------------|--|---|
| 全国共通に考慮すべき地震動 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ 許可基準解釈別記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。(別記2の記載は下記参照) <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。) | <ul style="list-style-type: none"> • 解釈 別記2に記載の、2004年北海道留萌支庁南部の地震の基盤地震動及び「標準応答スペクトル」の知見を用いて地震動を評価する。 |

全国共通に考慮すべき地震動の検討フロー

- 「全国共通に考慮すべき地震動」の評価について検討フローを示す。



目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

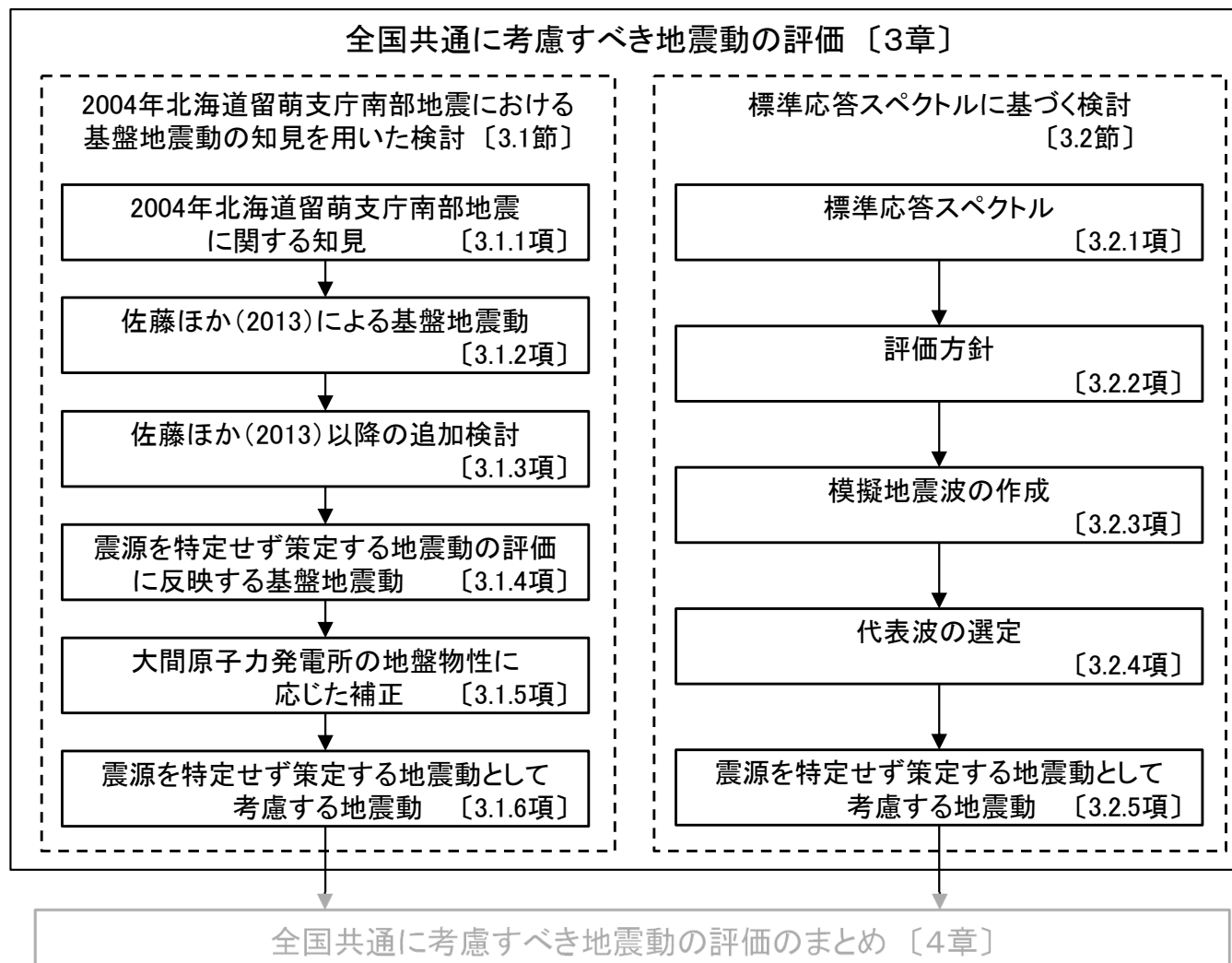
参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価

本章の説明箇所

- 本章において、「全国共通に考慮すべき地震動」の評価について説明する。



目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

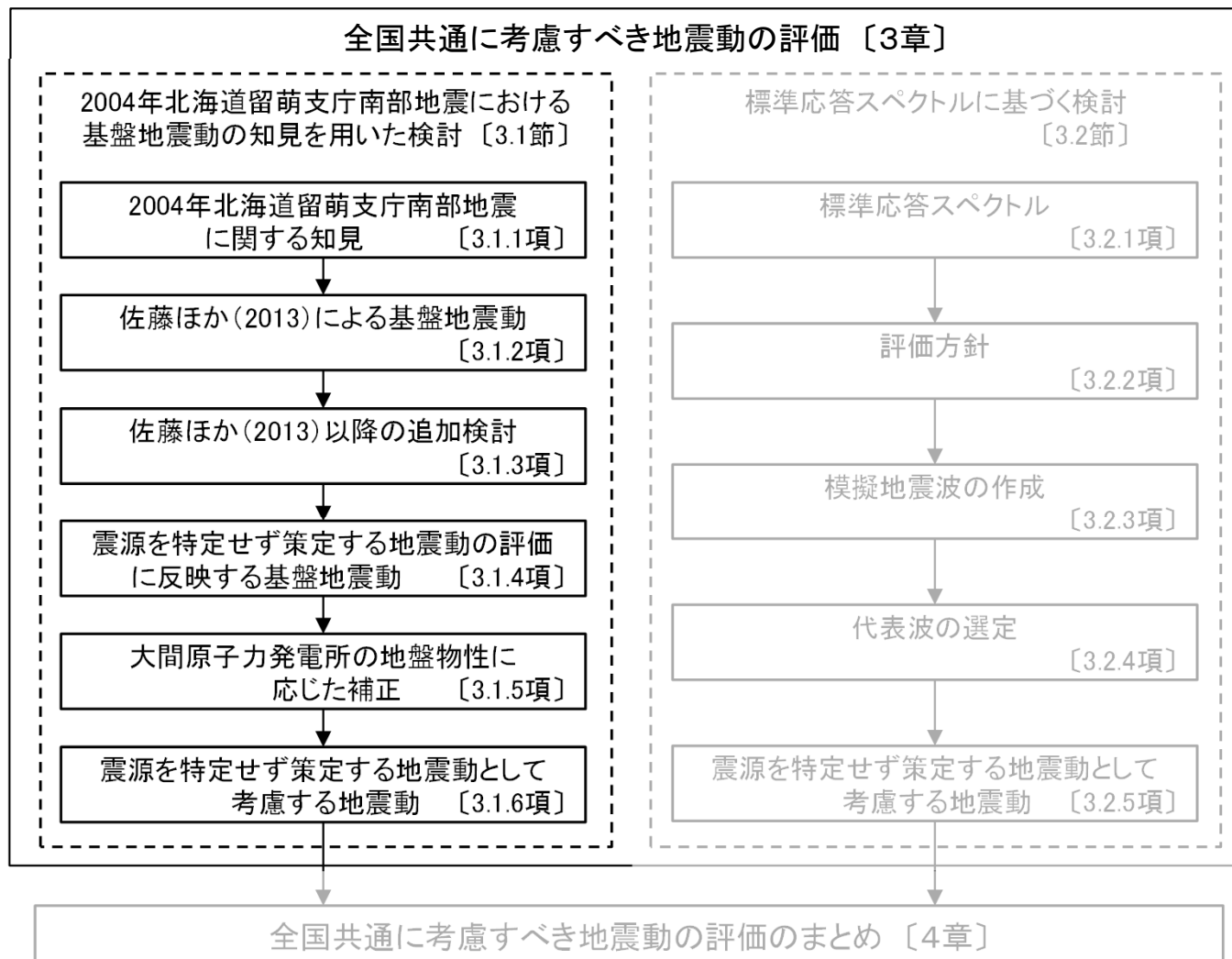
参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動



本節の説明箇所

- 本節において、「2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討」について説明する。
- 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見及び佐藤ほか(2013)による基盤地震動に基づき、各種追加検討及び大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正を行い、震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動を評価する。



3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 (1/5)



(1) 地震の概要

- 2004年北海道留萌支庁南部地震は、北海道内陸西部の歪み集中帯の深さ約9kmで発生した、東南東-西北西方向に圧力軸を持つ逆断層型の地震であった。

1. 地震発生日時(気象庁他)

- 発生日時:平成16年12月14日 14時56分頃
- 地震規模:M6.1(Mw5.7)
- 震源深さ:約9km
- 震源位置:北緯44.077°, 東経141.7°

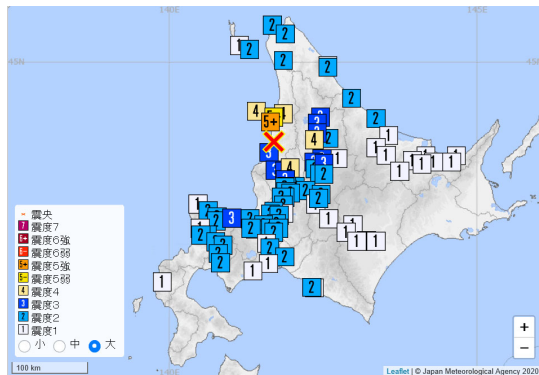
2. 各地の震度

各地の震度(気象庁)は以下のとおり。

- 震度5強:苫前町
- 震度5弱:羽幌町
- 震度4:初山別村, 剣淵町, 秩父別町

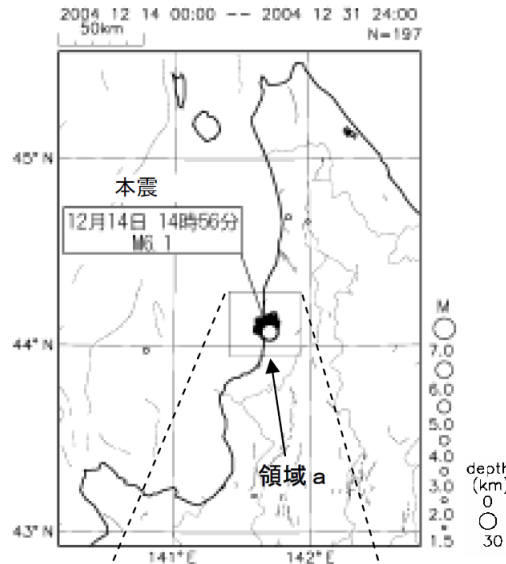
3. 地震発生メカニズム(気象庁)

- 発震機構解より、東南東-西北西方向に圧力軸を持つ逆断層型の地震。
- 本震位置より60km南方で1995年に発生したM5.9の地震の発震機構解は東西圧縮の逆断層型であり、この地域の東西圧縮の応力場と調和的である。
- 北海道内陸西部では、やや規模の大きな地震は、歪み集中帯で発生するようである。

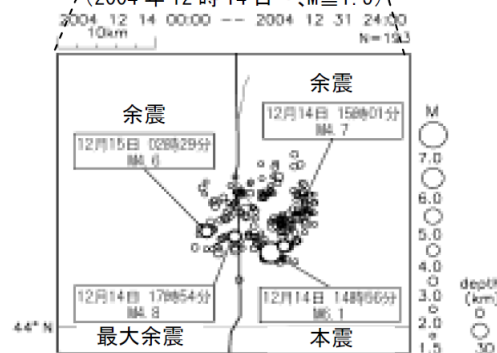


震度分布
(気象庁震度データベース)

震央分布図
(2004年12月14日~12月31日、M≥1.5)

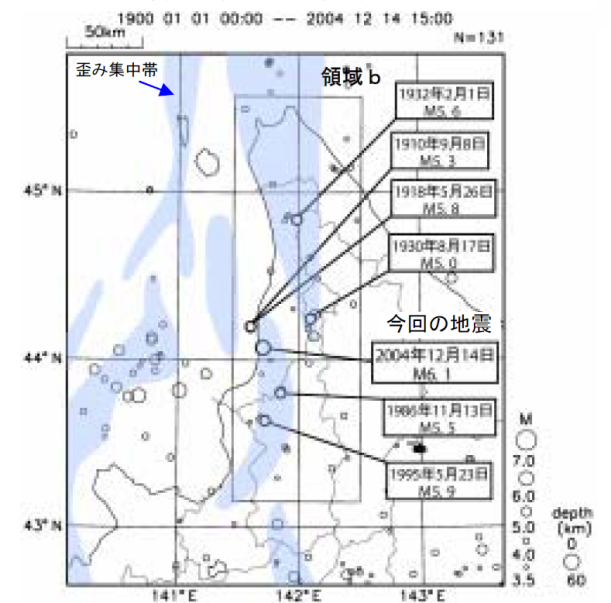


領域aの拡大図
(2004年12月14日~、M≥1.5)



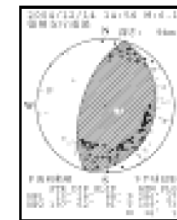
震央分布
(本震及び余震)

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。

2004年北海道留萌支庁南部地震
及び周辺で発生した主な地震



本震の発震機構
(P波初動解)

気象庁(2004)

3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 (2/5)



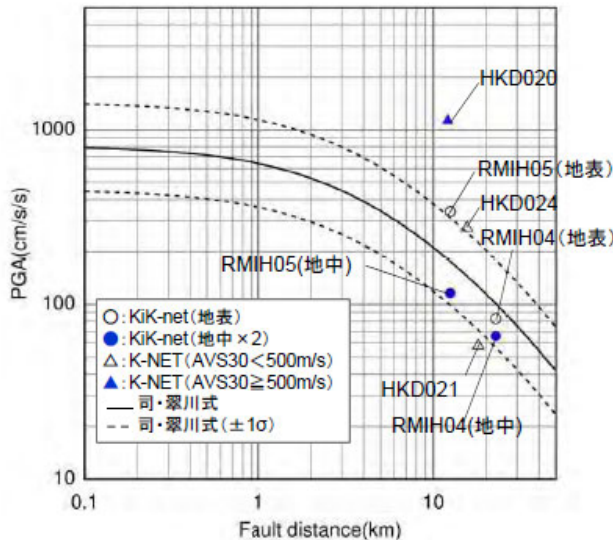
(2) 観測記録 (1/4)

① 断層最短距離30km以内の観測記録

- 断層最短距離30km以内の観測記録は5記録であった。このうち、震源近傍に位置するHKD020観測点において、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 σ を上回る。

断層最短距離30km以内の観測点(K-NET及びKiK-net観測点)における最大加速度

| | 観測点 | | 震源距離 (km) | AVS30 (m/s) | 最大加速度 (cm/s^2) | | |
|-------------------------------|--------|-----|--------------|----------------|---------------------------|---------------|--------------|
| | | | | | NS成分 | EW成分 | UD成分 |
| 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 (上段:地表) (下段: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 |



距離減衰式との関係

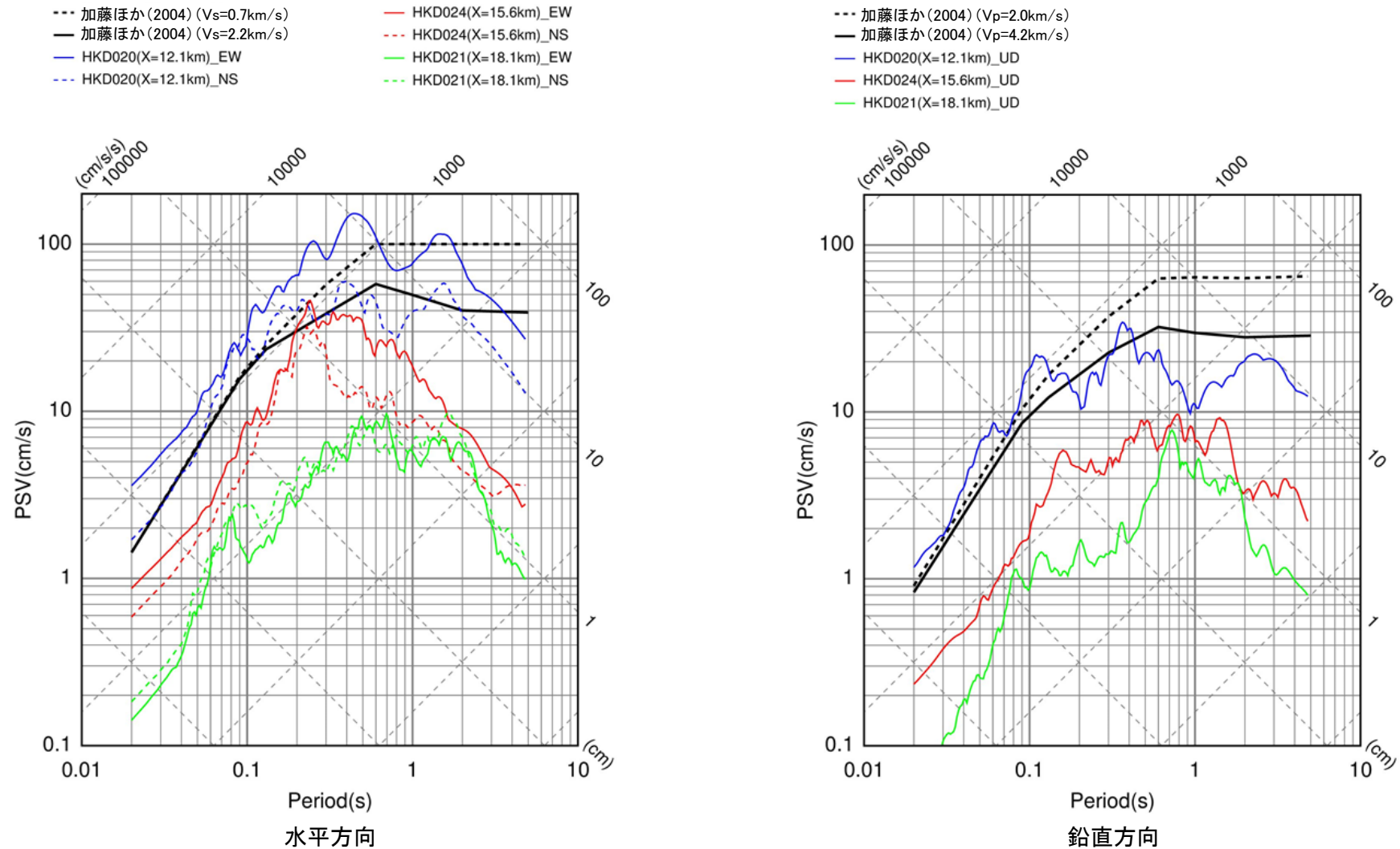
3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 (3/5)



(2) 観測記録 (2/4)

② 加藤ほか(2004)による応答スペクトルとの比較(K-NET観測点の観測記録)

- K-NET観測点の観測記録のうち、HKD020観測点では、加藤ほか(2004)による応答スペクトルを大きく上回る。
- また、HKD024観測点の観測記録は、HKD020観測点のEW成分に包絡される。



K-NET各観測点による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

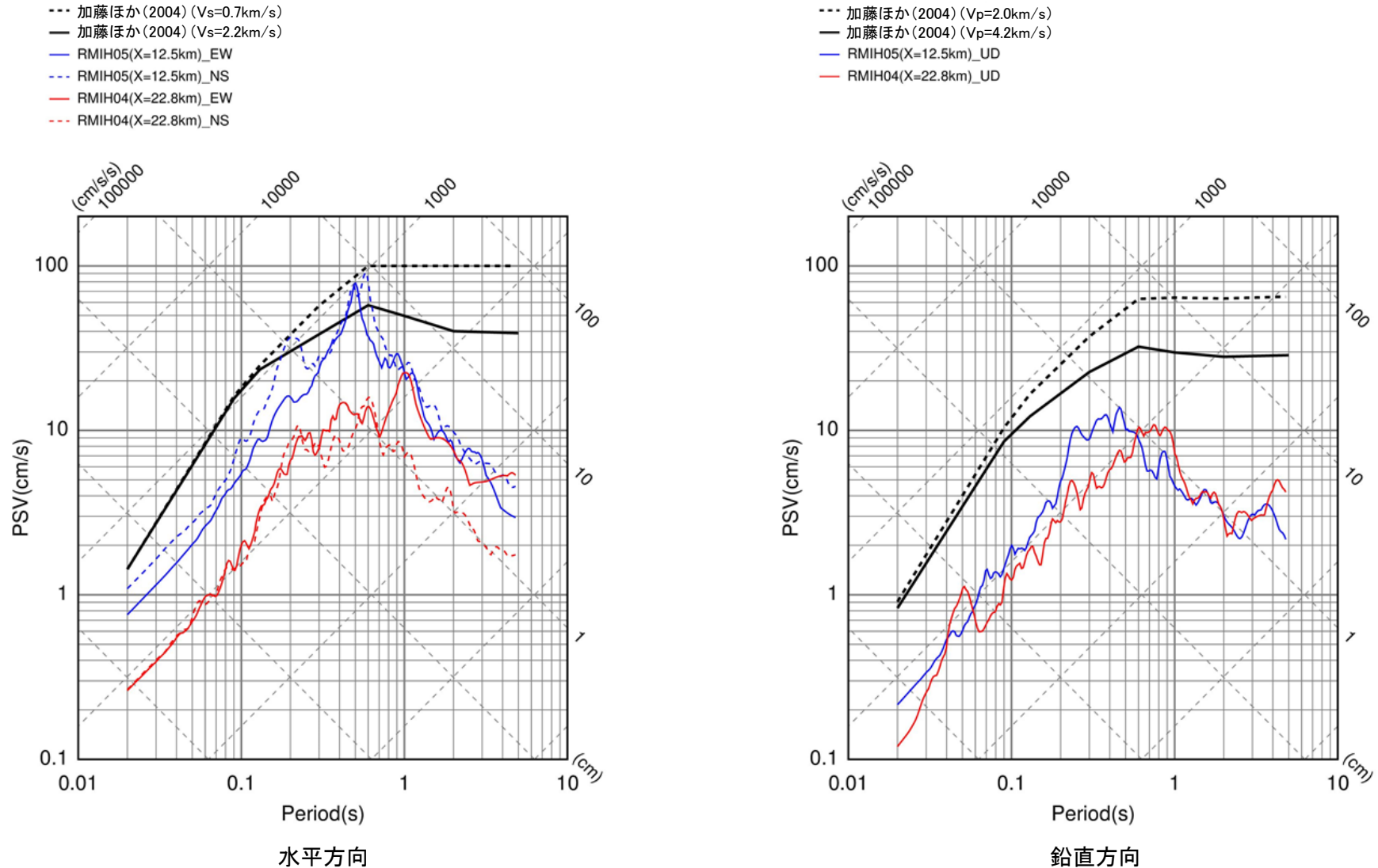
3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 (4/5)



(2) 観測記録 (3/4)

③ 加藤ほか(2004)による応答スペクトルとの比較(KiK-net観測点の地表観測記録)

- KiK-net観測点の地表観測記録は、すべて加藤ほか(2004)による応答スペクトルに包絡される。



KiK-net各観測点による応答スペクトル(地表)と加藤ほか(2004)による応答スペクトルの比較

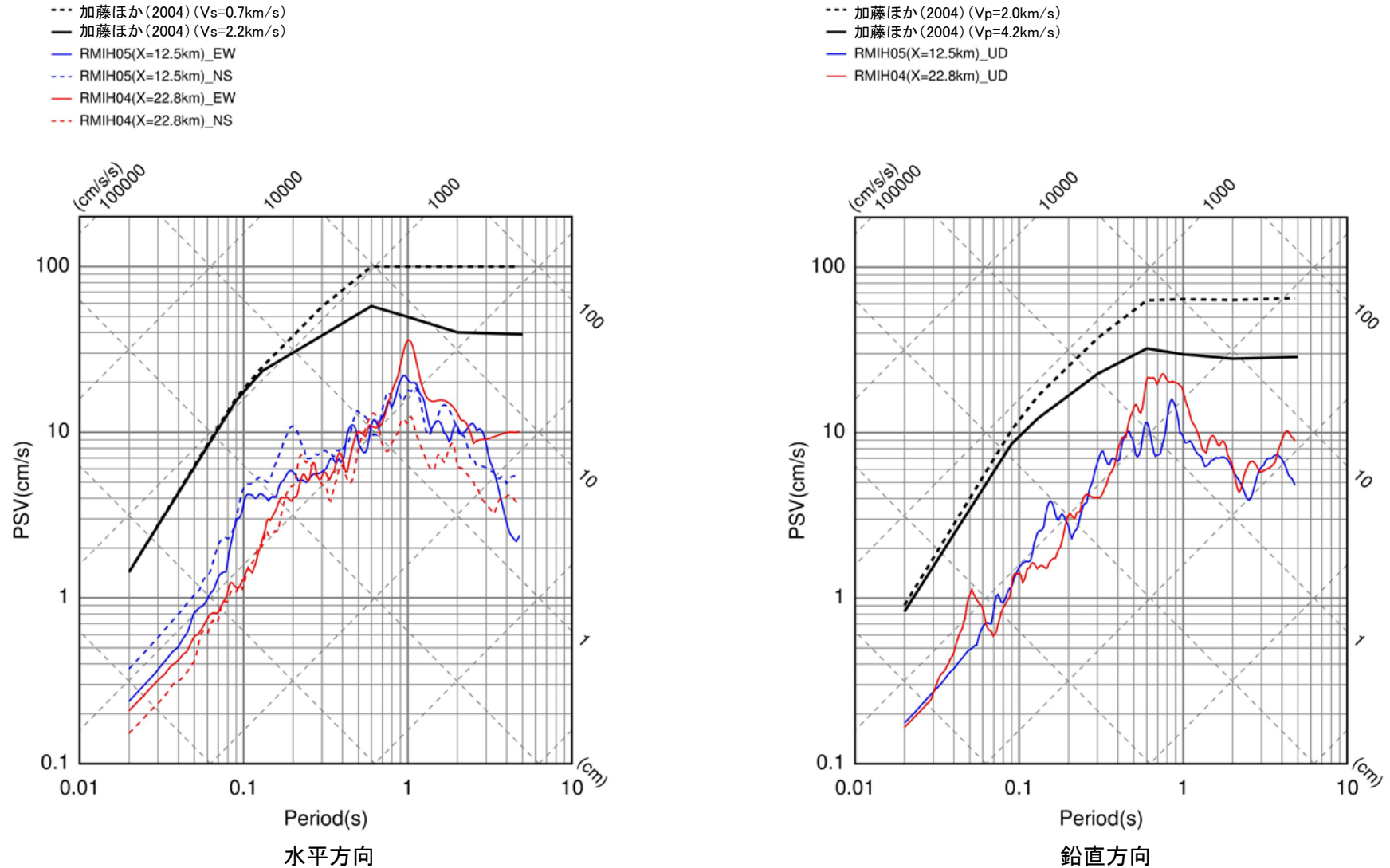
3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見 (5/5)



(2) 観測記録 (4/4)

④ 加藤ほか(2004)による応答スペクトルとの比較(KiK-net観測点の地中観測記録)

- KiK-net観測点の地中観測記録(地中×2)は、すべて加藤ほか(2004)による応答スペクトルに包絡される。



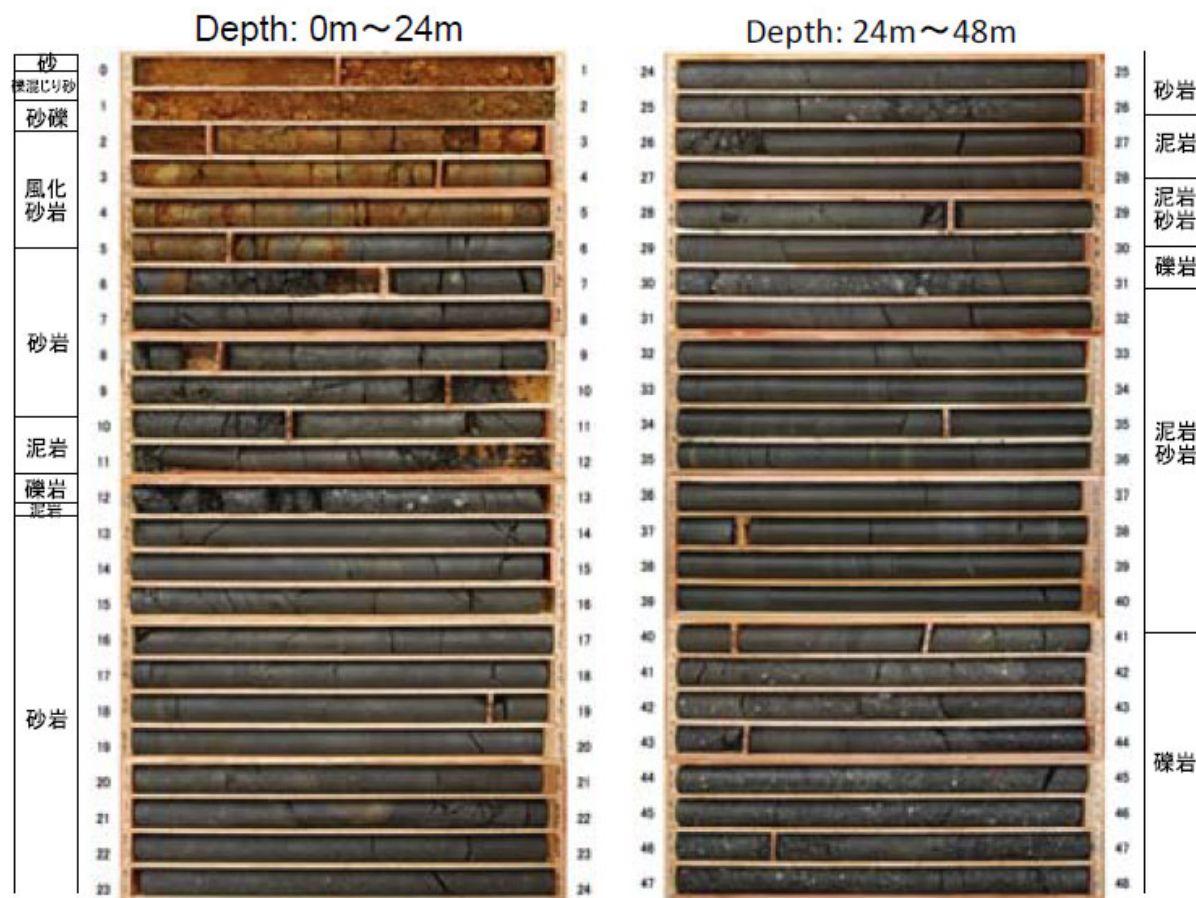
KiK-net各観測点による応答スペクトル(地中×2)と加藤ほか(2004)による応答スペクトルの比較

3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (1/7)



(1) HKD020観測点の物理探査 (1/3)

- 佐藤ほか(2013)では、加藤ほか(2004)による応答スペクトルを大きく上回るHKD020観測点の地質構造及び速度構造の把握を目的として、地震計設置地点の北西約5mの同一標高位置にて、300mまでの深さ(GL-300m)のボーリング掘削をオールコア採取で実施している。
- 13m付近の深さ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30m付近、さらに、41m以深に礫岩層が存在する構成となっている。



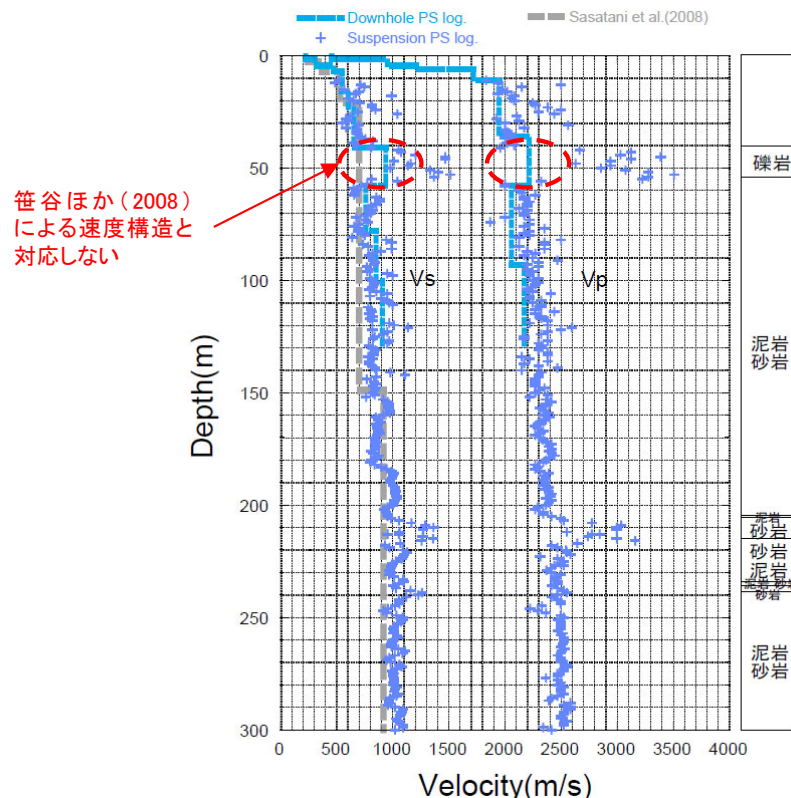
HKD020におけるボーリングコア写真
(左:深さ0m~24m, 右:深さ24m~48m)

3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (2/7)

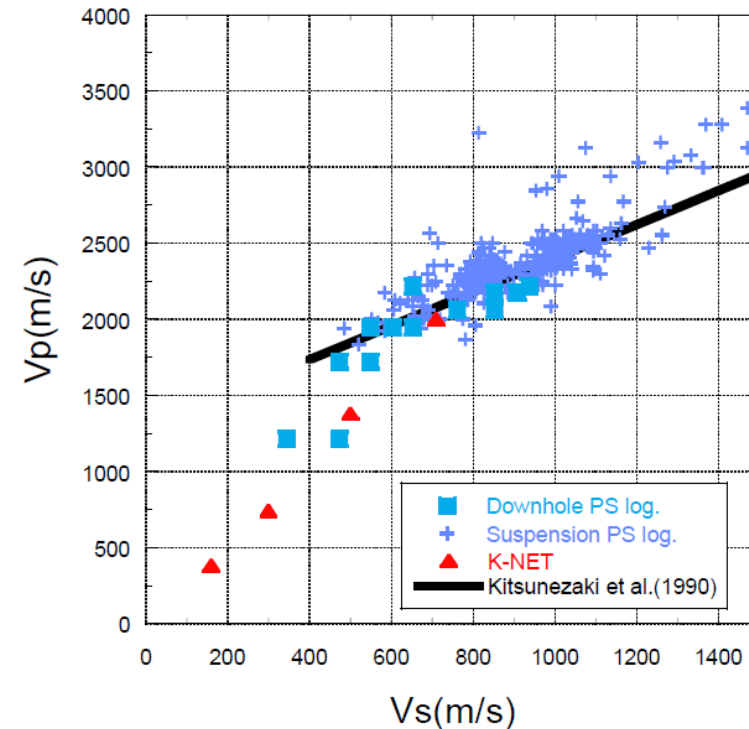


(1) HKD020観測点の物理探査 (2/3)

- 佐藤ほか(2013)では、ボーリング孔を用いて、GL-150mまでについてはダウンホール法とサスペンション法、GL-300mまでについてはサスペンション法によるPS検層を実施している。
- GL-50m付近までは、左下図中に赤破線の○で示す箇所のように、笹谷ほか(2008)の微動アレイ探査に基づくS波速度構造と佐藤ほか(2013)の調査によるS波速度構造は十分に対応しない。しかし、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GL-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 の観点から見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から V_s が700m/s以上では、 V_p が2000m/sを超えている。



HKD020におけるPS検層と
笹谷ほか(2008)によるS波速度構造モデル

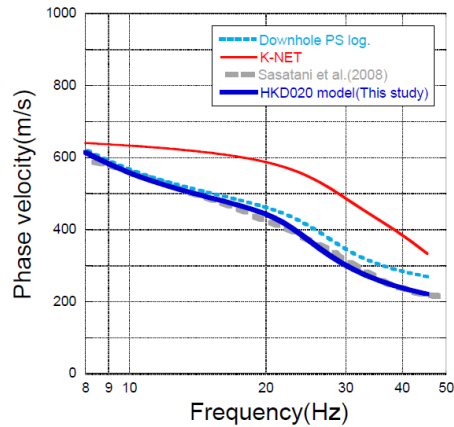


HKD020のPS検層結果による
 V_p - V_s 関係と既往の経験式の比較

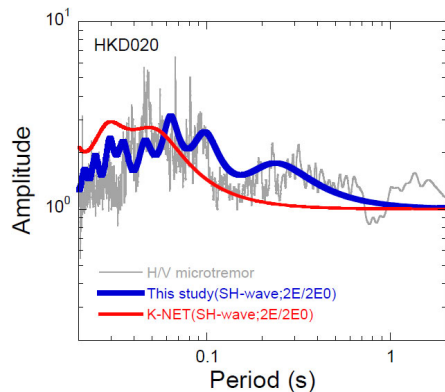
3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (3/7)

(1) HKD020観測点の物理探査 (3/3)

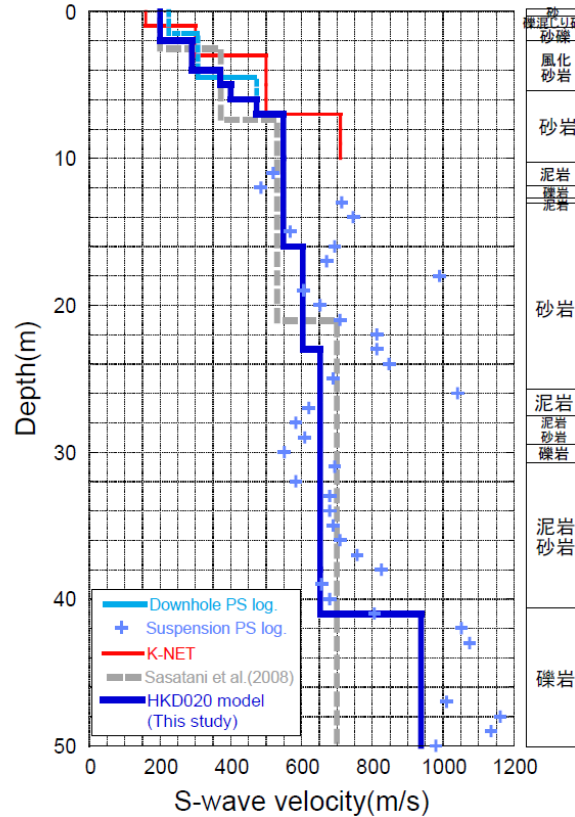
- 佐藤ほか(2013)では、ダウンホール法によるPS検層結果のVsが500m/s以下のGL-6mまでのS波速度を、笹谷ほか(2008)による位相速度を説明できるように若干修正し、HKD020観測点の地盤モデルを作成している。
- HKD020観測点の地盤モデルによるSH波の理論増幅特性の卓越周期は、微動H/Vスペクトルの卓越周期と周期0.02秒程度のごく短周期までよく対応している。K-NET地盤情報によるSH波の理論増幅特性は、微動H/Vスペクトルの卓越を説明できない。
- 以上から、佐藤ほか(2013)によるHKD020観測点の地盤モデルは、より妥当なモデルであると結論づけている。



HKD020におけるレイリー波位相速度の比較



HKD020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における地盤速度構造(S波速度構造)の比較

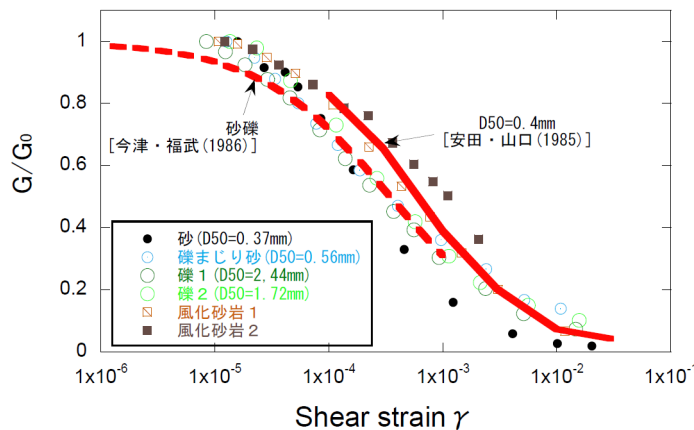
HKD020における地震動評価モデル

| 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 | | 200 | 2.00 | 1.0 | 0.02 | 礫1 |
| 1.5 | 952 | 290 | 2.00 | 1.0 | 0.01 | 礫2 |
| 2 | | | | 1.0 | 0.01 | 風化砂岩1 |
| 3 | | | | 1.0 | 0.01 | 風化砂岩2 |
| 4 | | | | 1.0 | 0.01 | 風化砂岩2 |
| 5 | 1722 | 473 | 2.00 | 1.0 | 0.01 | — |
| 6 | | | | 9.0 | 0.01 | — |
| 7 | | | | 7.0 | 0.01 | — |
| 16 | | | | 7.0 | 0.01 | — |
| 23 | | | | 7.0 | 0.01 | — |
| 38 | 2215 | 653 | 2.06 | 18.0 | 0.01 | — |
| 41 | | | | — | 0.01 | — |

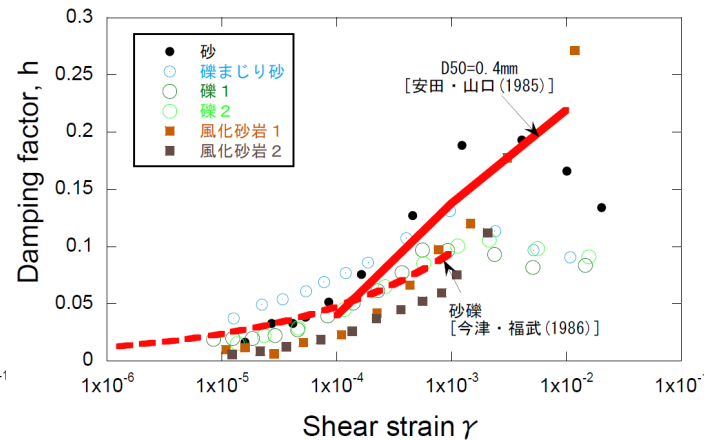
3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (4/7)

(2) HKD020観測点の基盤地震動評価 (1/4)

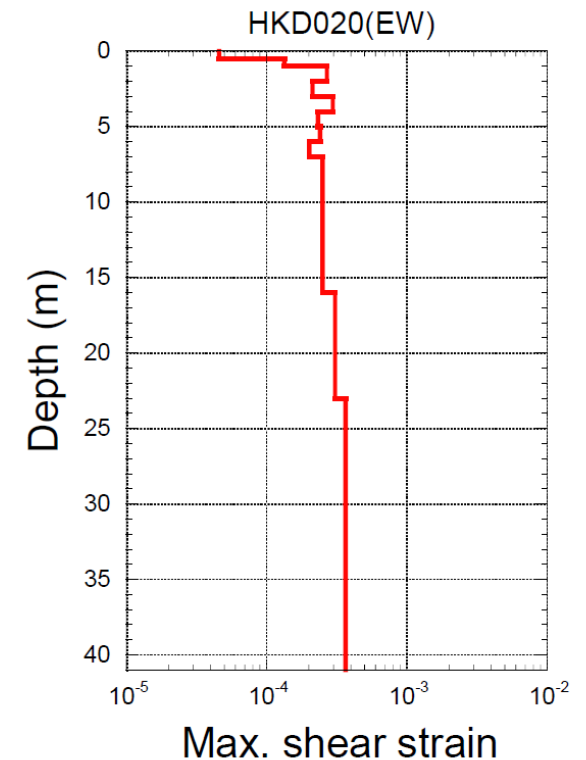
- 佐藤ほか(2013)では, GL-6mまでの土質地盤の6点において, GPサンプリングにより試料採取し, 0.2Hzの正弦波による繰り返し三軸試験によって地盤の剛性 G および減衰 h のひずみ γ 依存性を取得している。
- ひずみレベルが 10^{-4} オーダーで G/G_0 が0.6程度, すなわち初期の剛性から約4割程度低下している。
- G/G_0 のひずみ依存性に関する既往の経験式との対応が良い。
- 室内試験を実施した砂, 礫混じり砂, 礫, 風化砂岩に対応するGL-6m程度までの地盤は, 強震時に非線形性を生じやすい特性であるとしている。



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



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



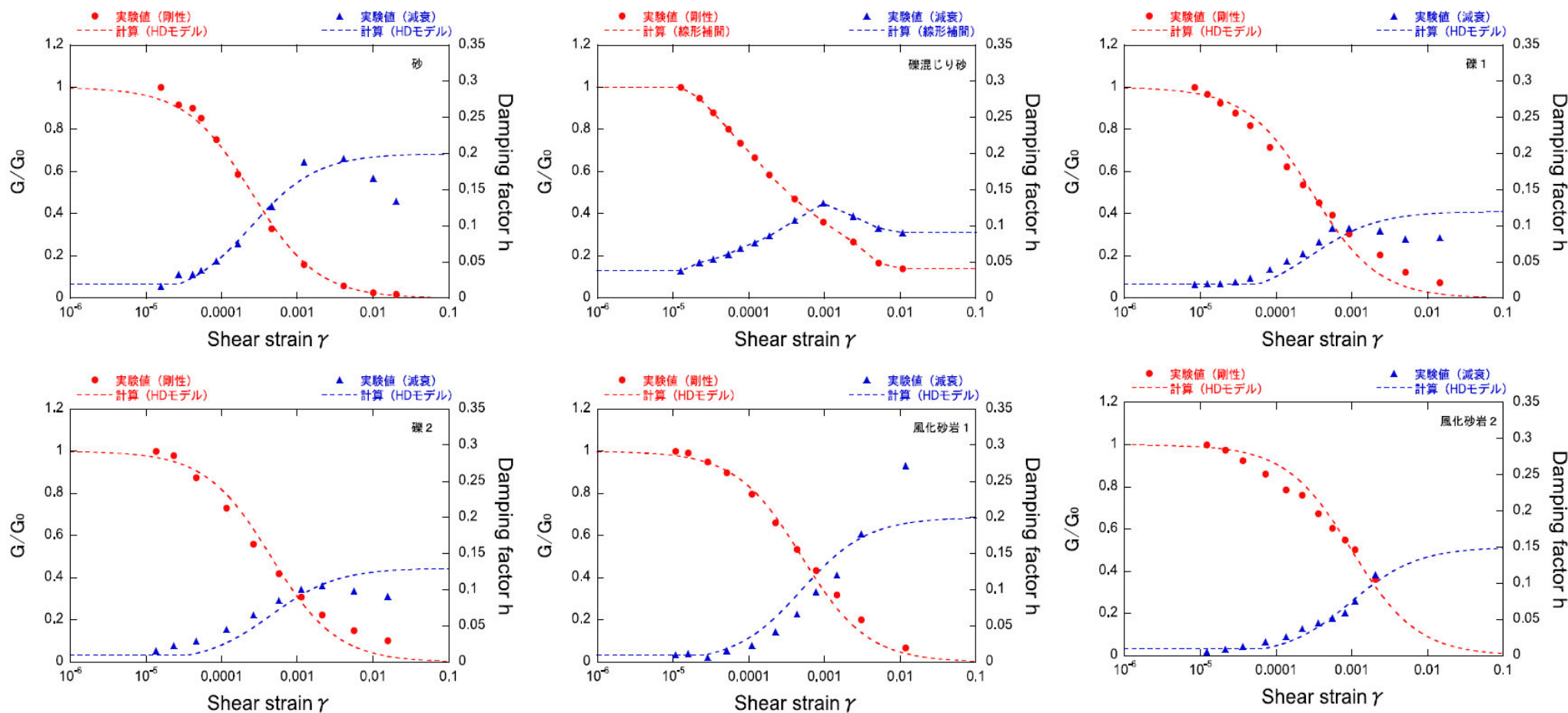
2004年留萌地震時の地盤の最大せん断ひずみの深さ分布の試算結果(線形解析)

3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (5/7)



(2) HKD020観測点の基盤地震動評価 (2/4)

- 佐藤ほか(2013)では、GL-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($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)を設定している。



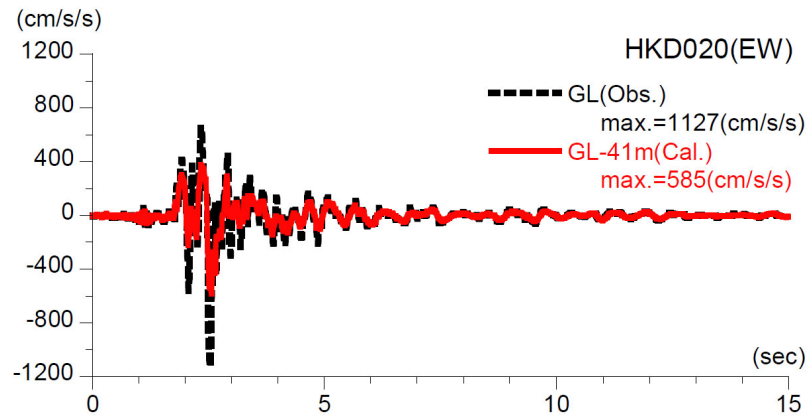
等価線形解析において設定した地盤の非線形特性

3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (6/7)

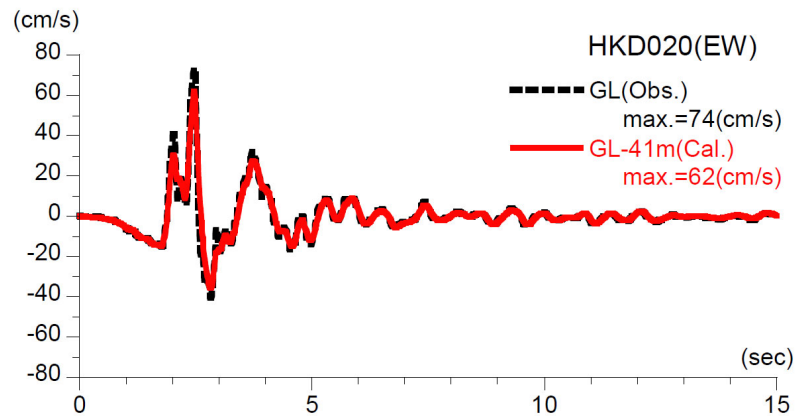


(2) HKD020観測点の基盤地震動評価 (3/4)

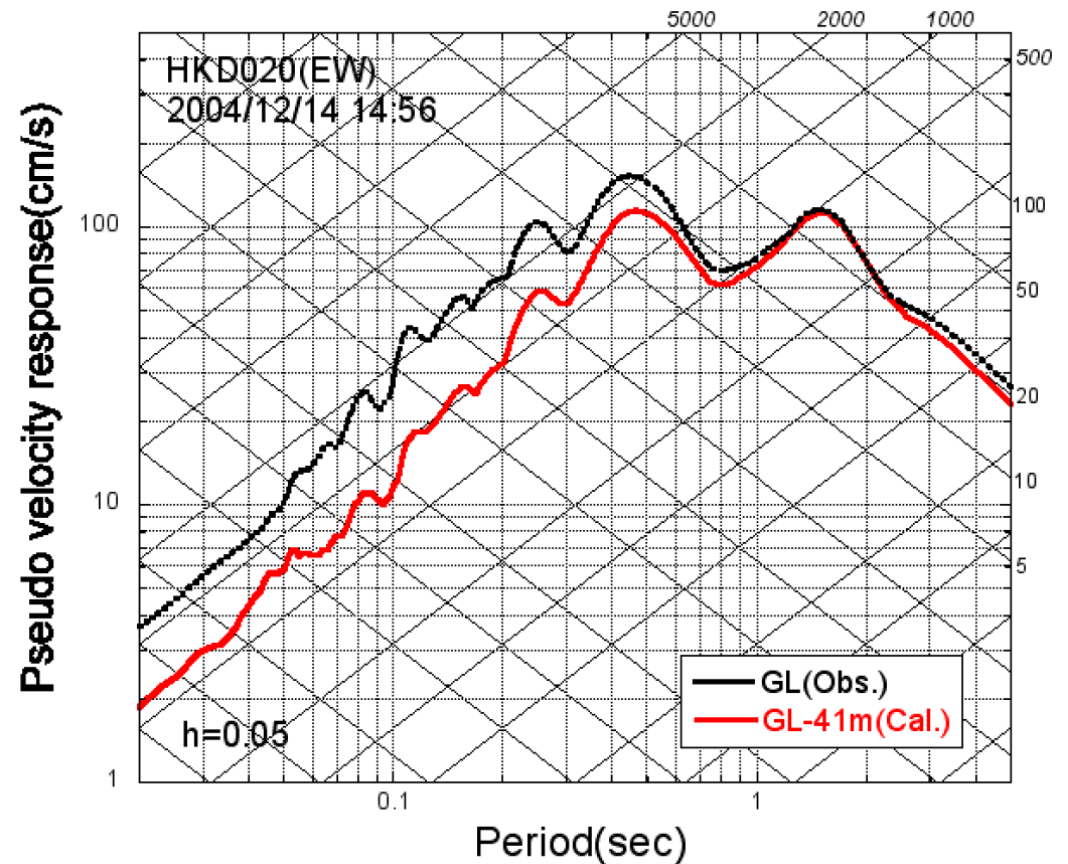
- 佐藤ほか(2013)により、観測点における物理探査結果及び室内試験結果を用いて、観測記録に対して観測点の地盤物性を適切に考慮して基盤地震動が評価されている。水平方向(EW成分)については、等価線形解析により、深さ41mでの基盤地震動として、最大加速度は、 585cm/s^2 のはぎとり結果が得られている。



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



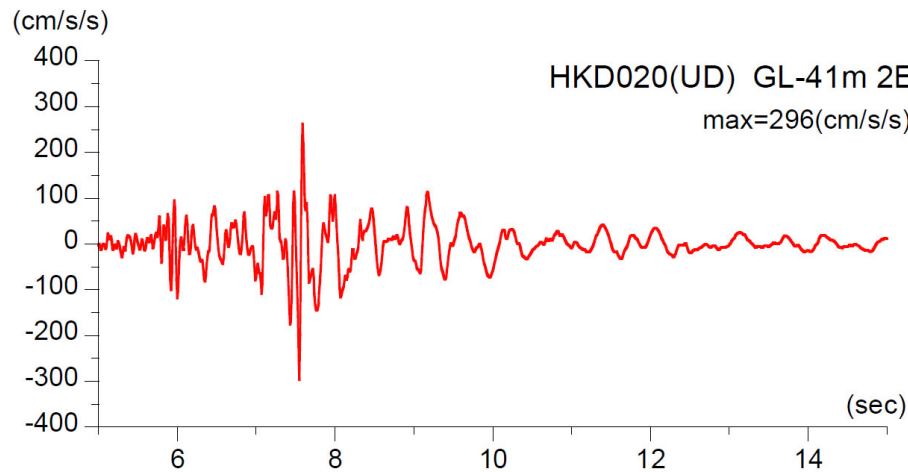
擬似速度応答スペクトルの比較

3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動 (7/7)

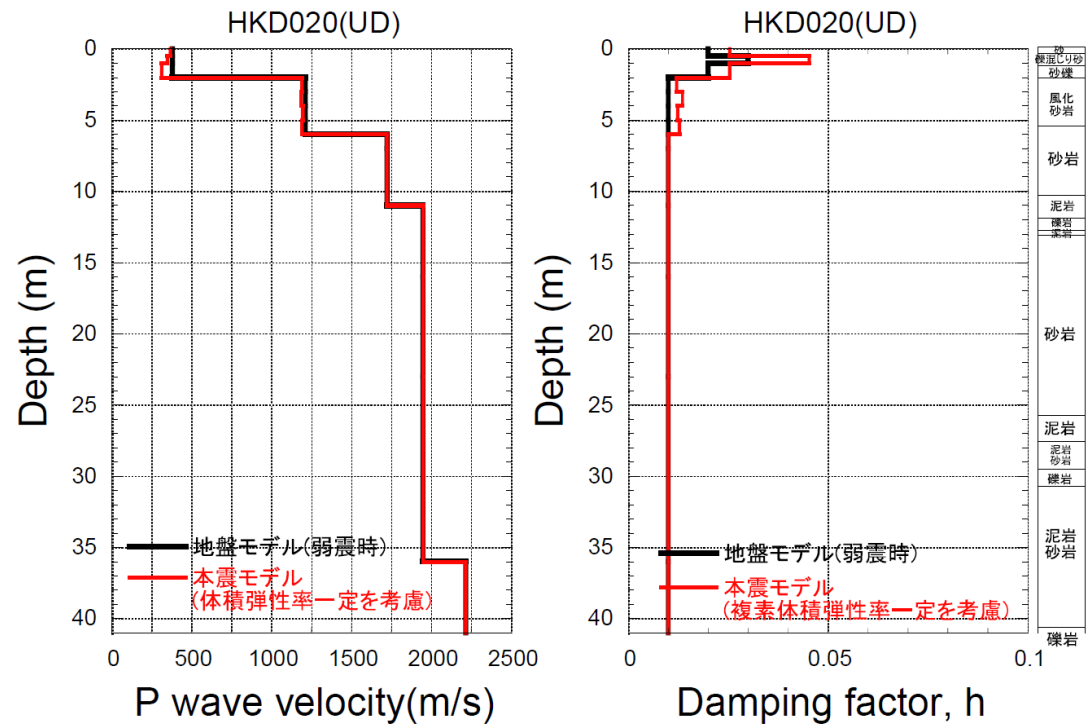


(2) HKD020観測点の基盤地震動評価 (4/4)

- 佐藤ほか(2013)により、観測点における物理探査結果及び室内試験結果を用いて、観測記録に対して観測点の地盤物性を適切に考慮して基盤地震動が評価されている。鉛直方向については、一次元波動論による線形解析により、深さ41mでの基盤地震動として、最大加速度は、 296cm/s^2 と評価している。



鉛直方向の基盤地震動の推計結果



2004年留萌地震時のP波速度と減衰定数

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (1/19)



(1) 検討内容

- 佐藤ほか(2013)では、K-NET HKD020観測点について、GL-6mまでの室内試験結果を考慮した非線形解析を行い、GL-41mの基盤面における基盤地震動を評価している(GL-6m以深は線形を仮定し、減衰は1%に設定)。
- 上記の佐藤ほか(2013)以降、以下の追加調査結果(室内試験及びPS検層再測定)を踏まえた検討等を行い、HKD020観測点における基盤地震動を再評価した。
 - ① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向)

佐藤ほか(2013)の報告時点以降に得られた、GL-6mからGL-41mまでの室内試験結果を用い、GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動(水平方向)を評価。
 - ② GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)

不確かさを考慮した基盤地震動の評価として、GL-6mまで非線形、GL-6m以深は減衰定数3%として基盤地震動(水平方向)を評価。
 - 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)

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 地下水位の状況を踏まえGL-6mまでポアソン比一定とした基盤地震動評価(鉛直方向)

HKD020観測点における地下水位の状況を踏まえ、GL-6mまではポアソン比一定、GL-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。

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (2/19)

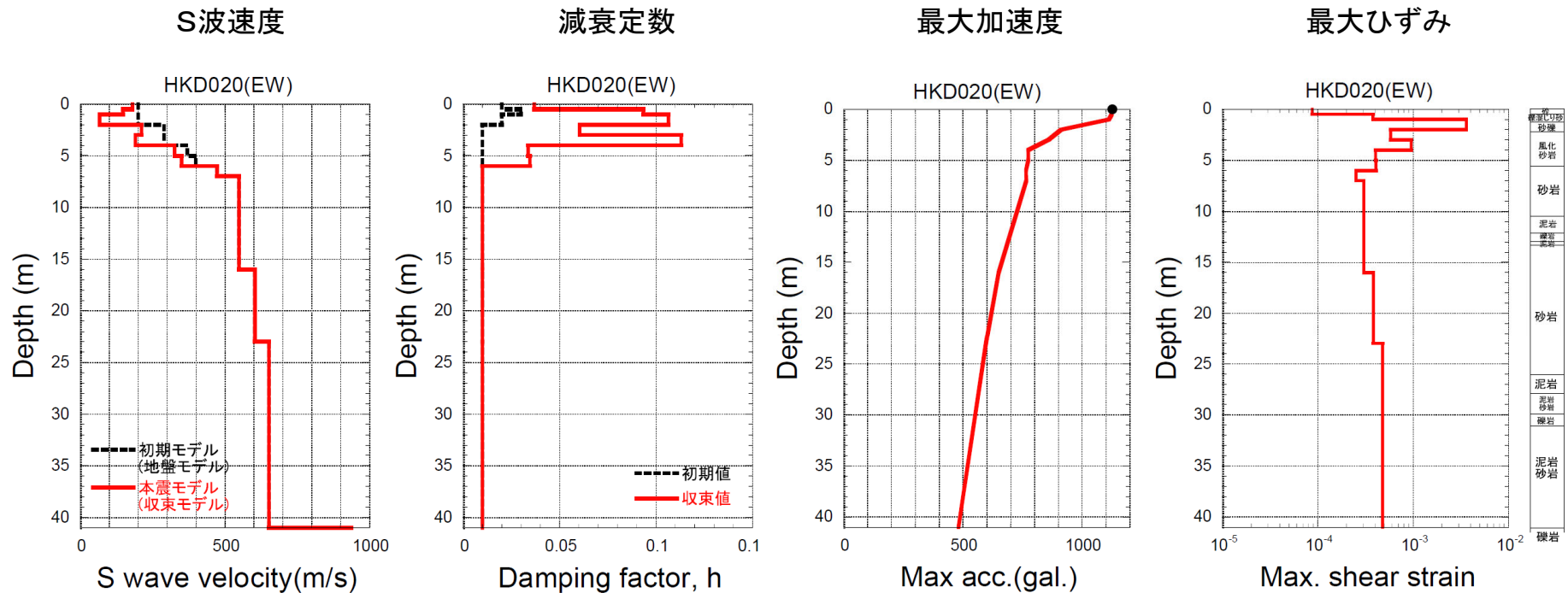


(2) 各種検討 (1/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (1/10)

i) 検討方針

- 佐藤ほか(2013)では、GL-6mまで室内試験結果を考慮した非線形解析を行い、GL-41mの基盤面における基盤地震動を推定している。この際、GL-6m以深は線形地盤を仮定し、減衰定数は風化砂岩の2サンプルについて室内試験で得られた微小ひずみ時の減衰定数1%を与えている。
- その後、GL-6mからGL-41mまでの室内試験結果を踏まえ、基盤地震動の評価結果の妥当性確認のため、GL-41mまで非線形性を考慮して基盤地震動評価を行った。



収束物性値, 最大加速度および最大ひずみの深さ分布

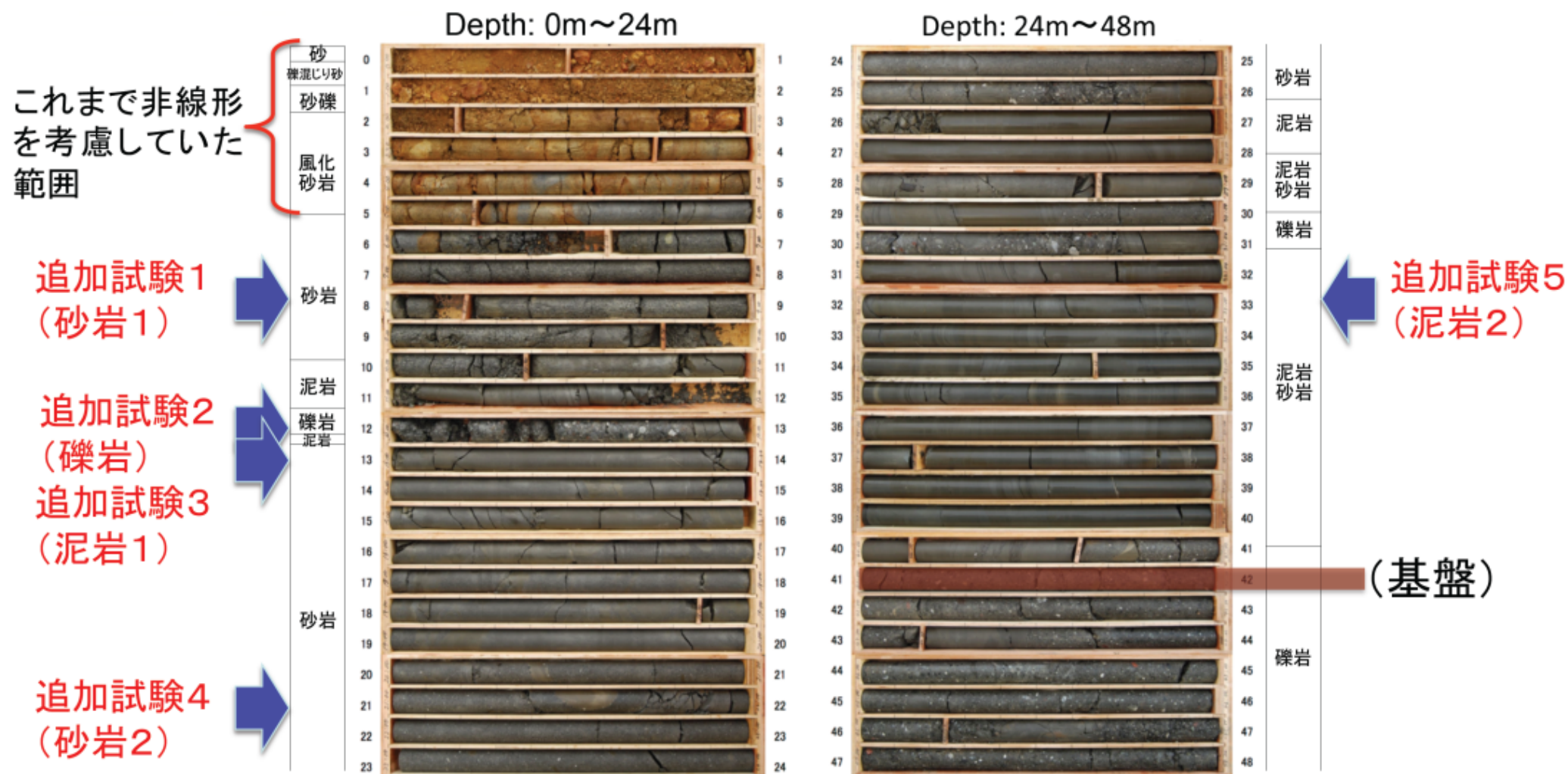
3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (3/19)

(2) 各種検討 (2/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (2/10)

ii) 追加試験の実施

- GL-6mからGL-41mまでの5種類の地層における試料を対象に、室内試験を実施した。



3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (4/19)

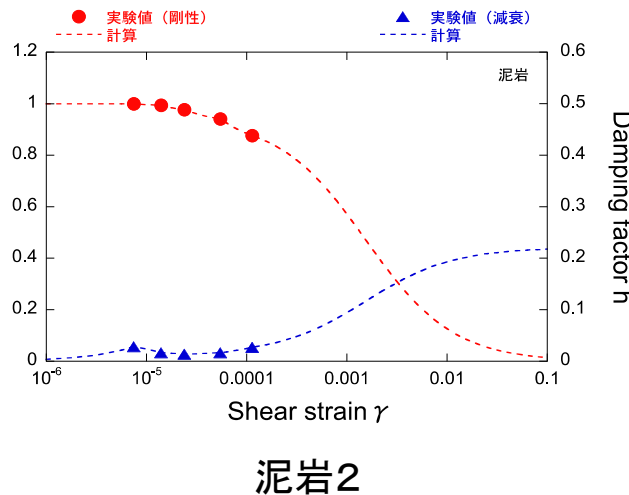
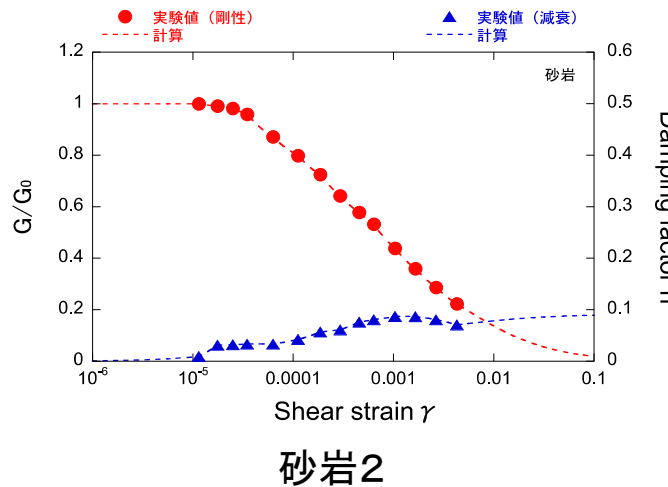
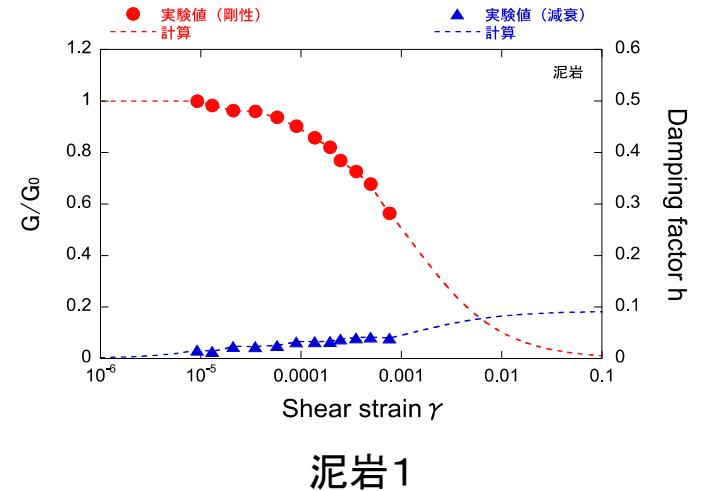
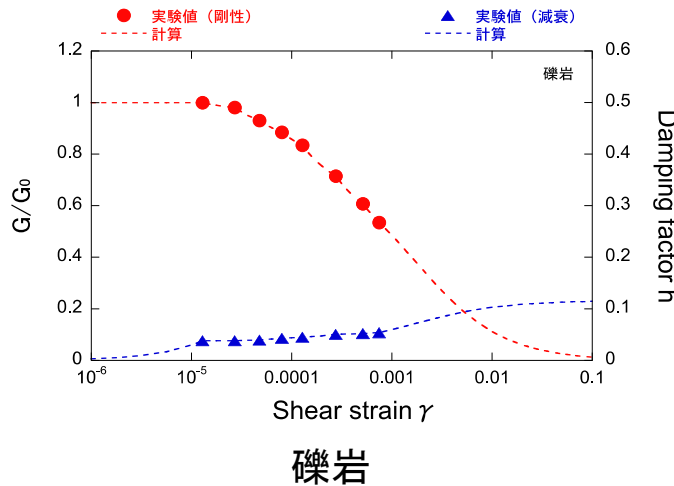
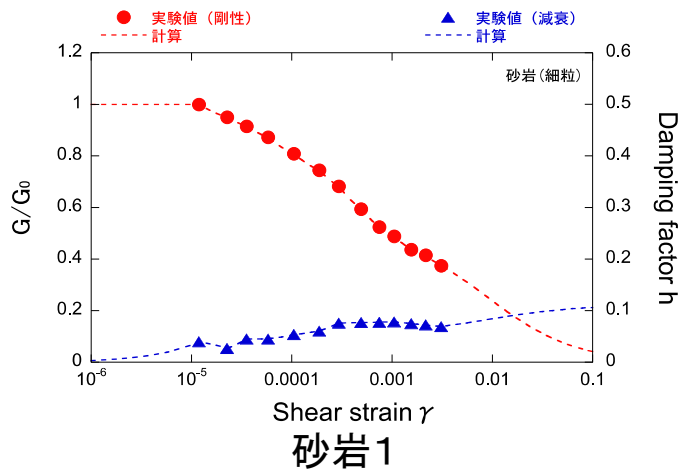


(2) 各種検討 (3/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (3/10)

iii) 非線形特性の設定

- 追加の室内試験結果により非線形特性を設定した。



3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (5/19)

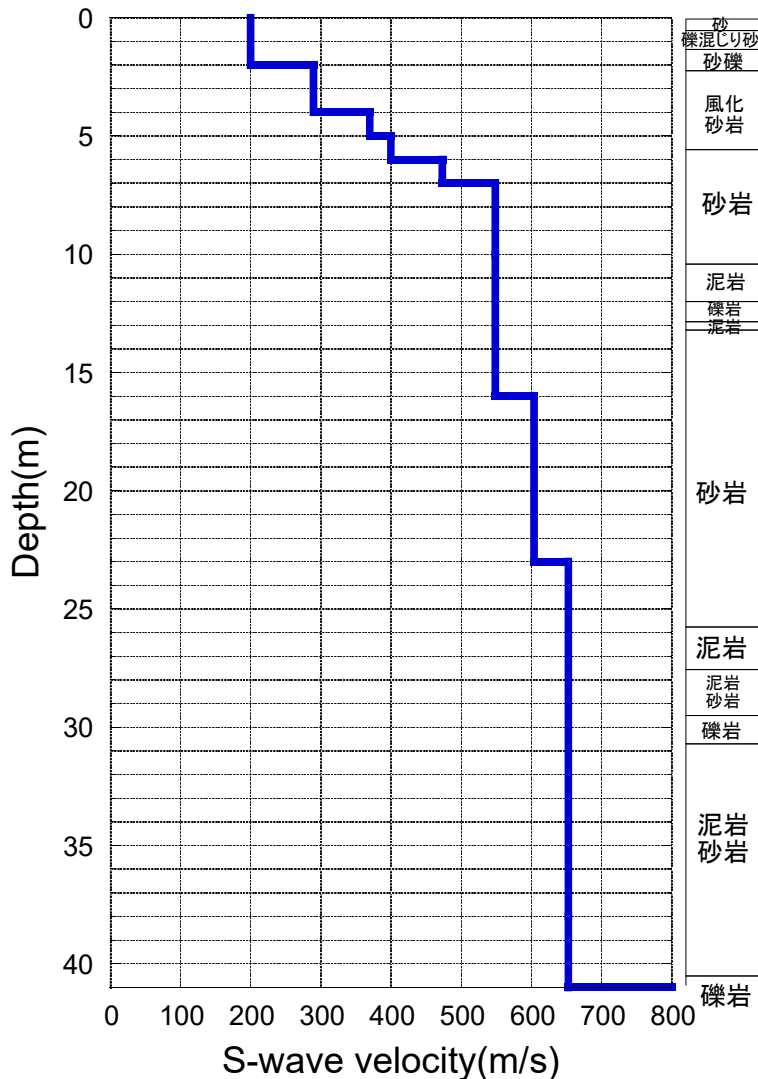


(2) 各種検討 (4/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (4/10)

iv) 地盤モデル

- GL-6mからGL-41m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基盤地震動を評価した。



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 | 0.02 | 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 | — |

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (6/19)

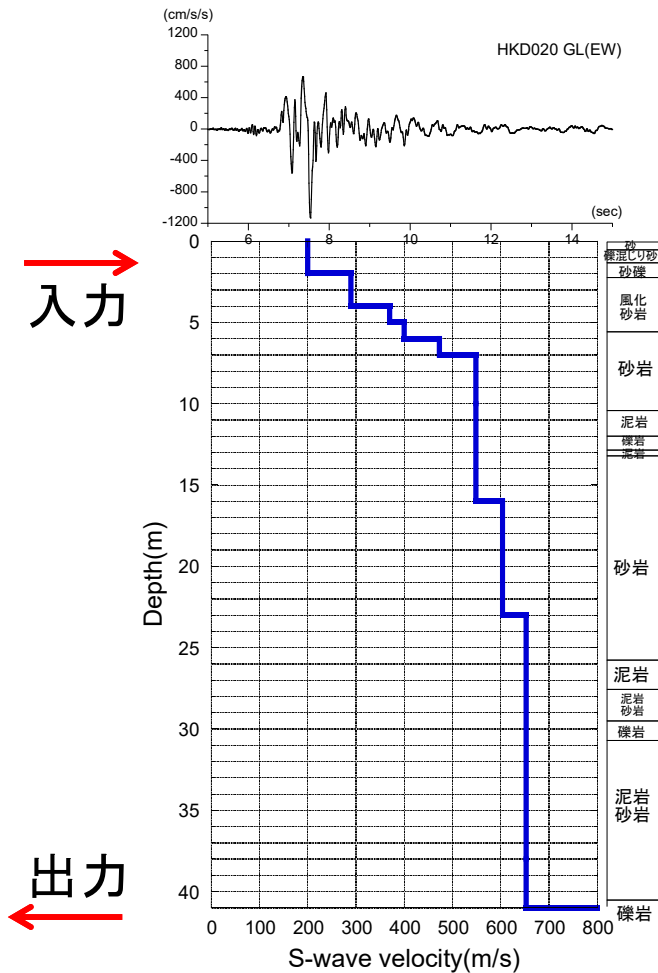


(2) 各種検討 (5/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (5/10)

v) 等価線形解析の条件

- 地表観測記録を入力として、GL-41mまで非線形性を考慮した等価線形解析から、GL-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

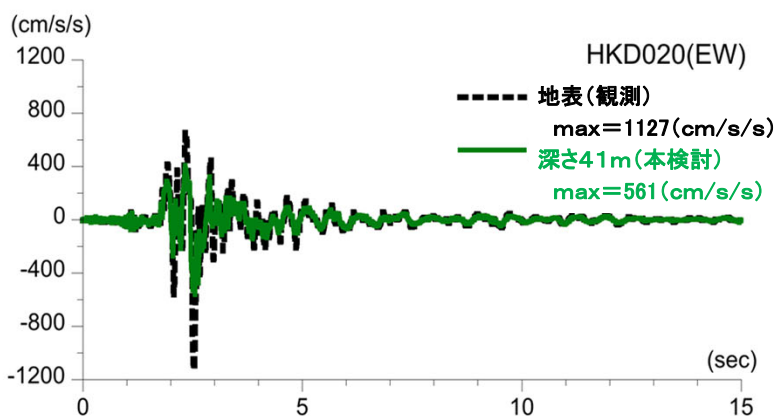
3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (7/19)

(2) 各種検討 (6/18)

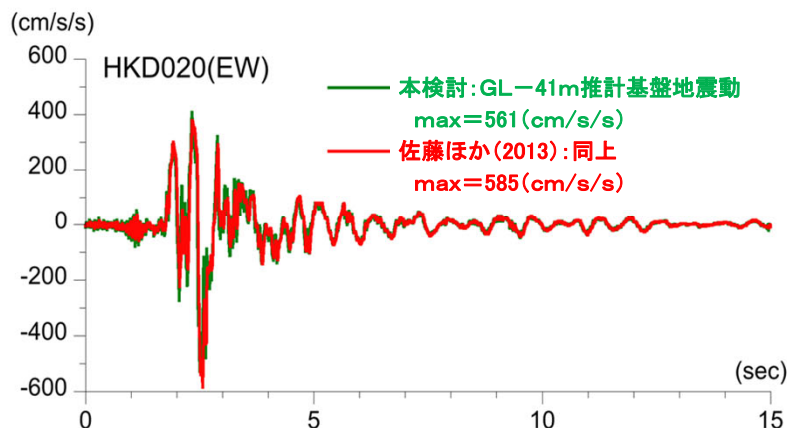
① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (6/10)

vi) 基盤地震動評価結果(加速度波形, 加速度フーリエスペクトル)

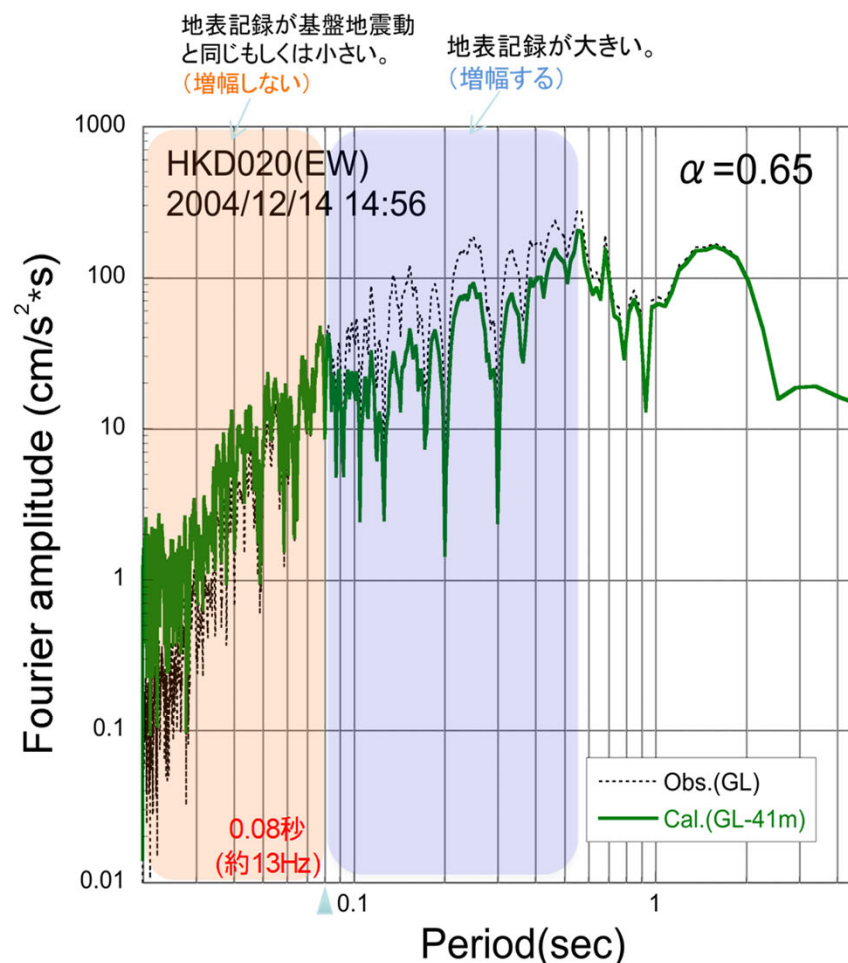
- GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動の最大加速度は、 561cm/s^2 となっており、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s^2)と比較すると、やや小さく評価された。



地表記録と推計基盤地震動の比較



本検討と佐藤ほか(2013)の比較



推計した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

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (8/19)

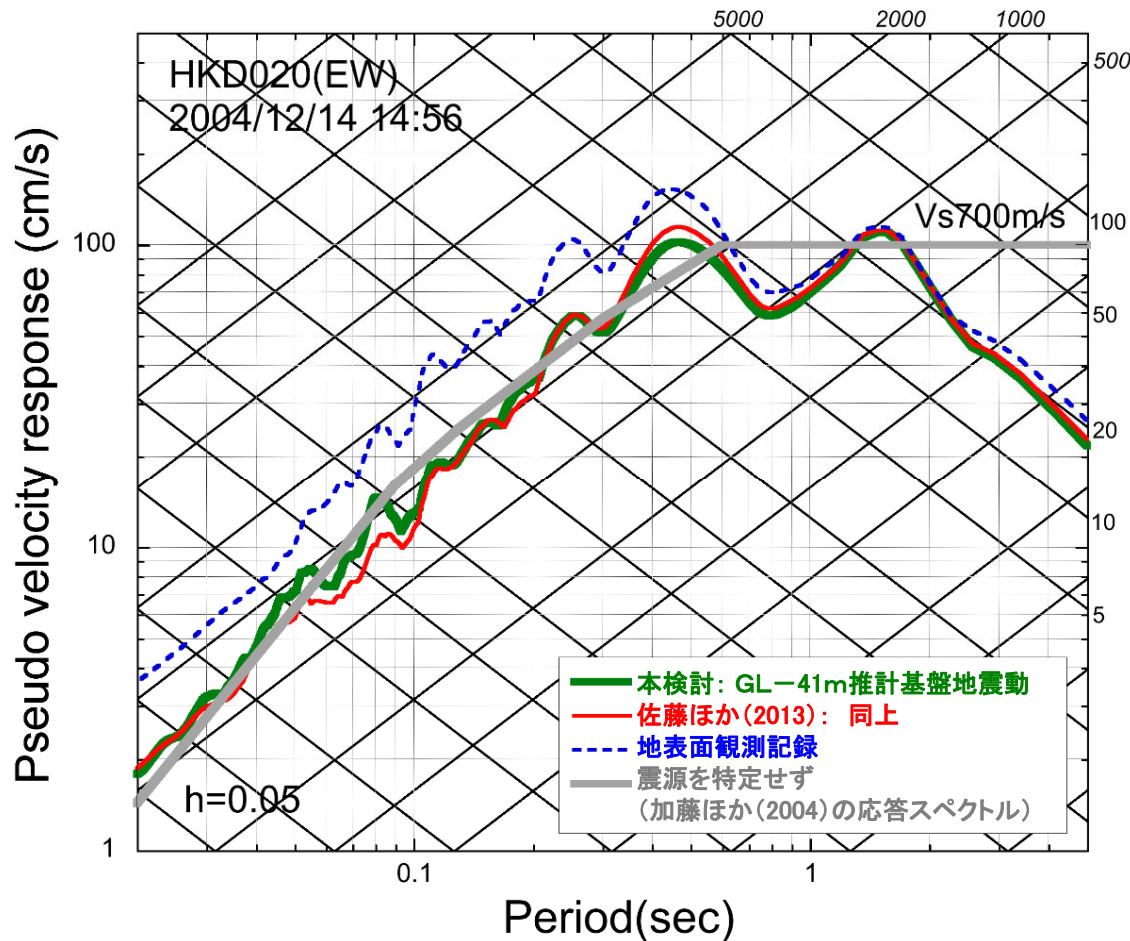


(2) 各種検討 (7/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (7/10)

vii) 基盤地震動評価結果(応答スペクトル)

- GL-41mまで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。



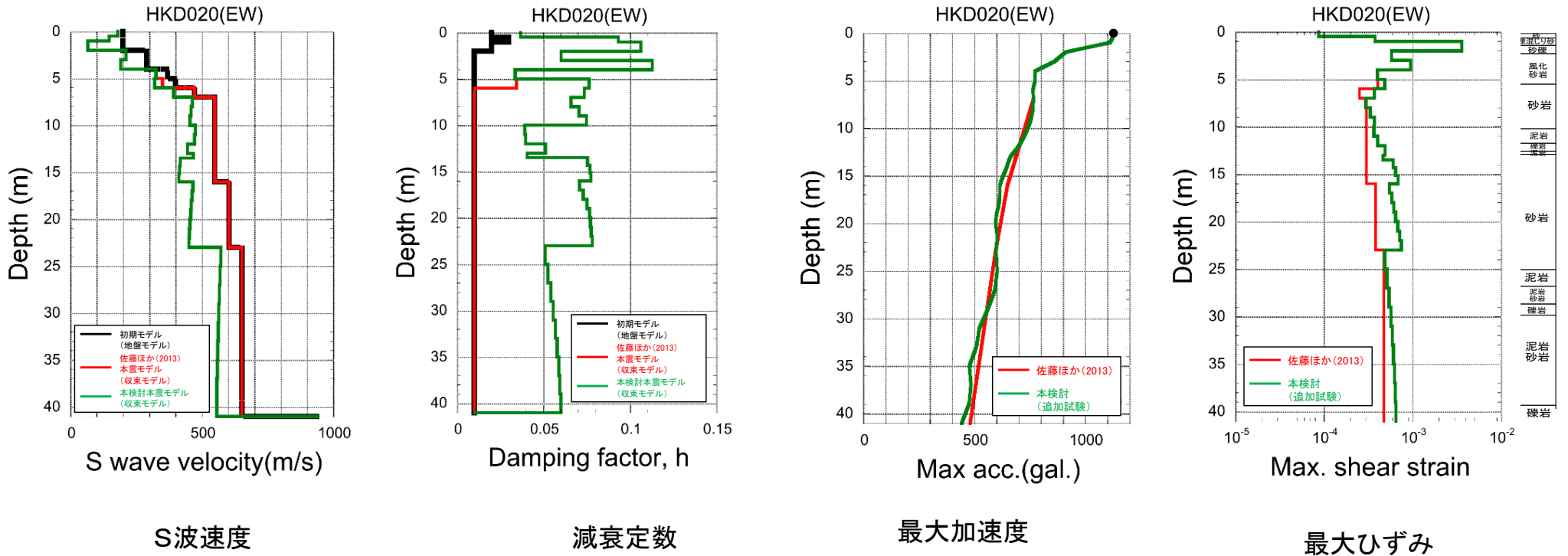
擬似速度応答スペクトル

(2) 各種検討 (8/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (8/10)

viii) 基盤地震動評価結果(収束物性値)

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



収束物性値および最大加速度および最大ひずみの深さ分布(EW成分)

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (10/19)

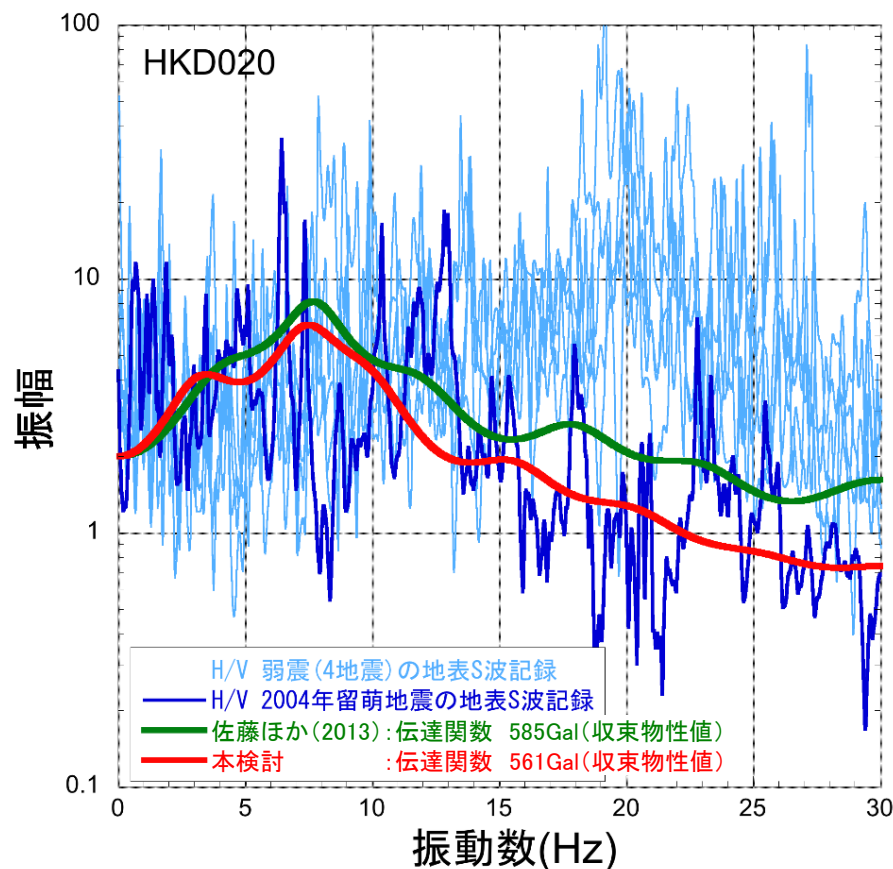


(2) 各種検討 (9/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (9/10)

ix) 基盤地震動評価結果(伝達関数)

- GL-41mまで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。
- 本震時のH/Vスペクトルと伝達関数の比較では、本検討の伝達関数は高振動数での落ち込みが大きく、佐藤ほか(2013)の伝達関数の方が本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現している。



本震時のH/Vスペクトルと収束物性値の伝達関数の比較

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (11/19)



(2) 各種検討 (10/18)

① GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向) (10/10)

x)まとめ

- 2004年北海道留萌支庁南部地震におけるHKD020観測点の観測記録について、追加の室内試験結果を用い、GL-41mまで非線形性を考慮した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た。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。
- GL-41mまで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、高振動数側で小さくなっており、本震時のH/Vスペクトルと伝達関数の比較では、佐藤ほか(2013)の伝達関数の方が本震時のH/Vスペクトルの特徴をよく再現しているものと考えられる。

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (12/19)



(2) 各種検討 (11/18)

② GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)(1/4)

i) 等価線形解析条件

- 佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、GL-6mまで非線形、GL-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)における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。

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (13/19)

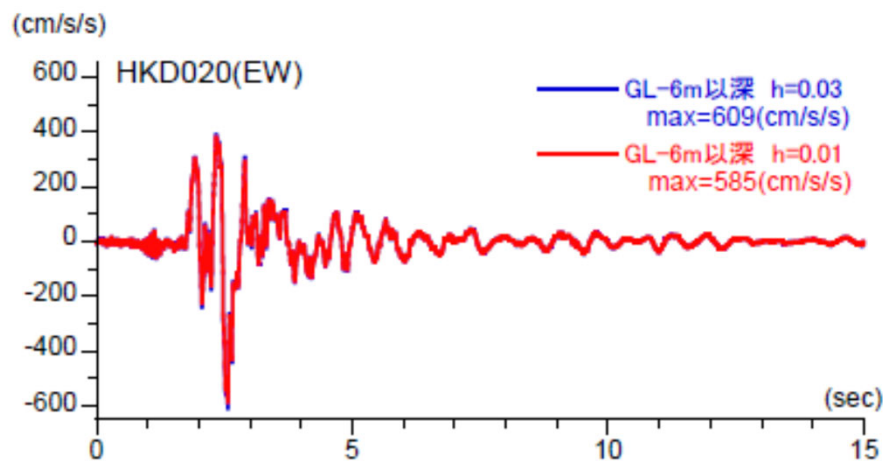


(2) 各種検討 (12/18)

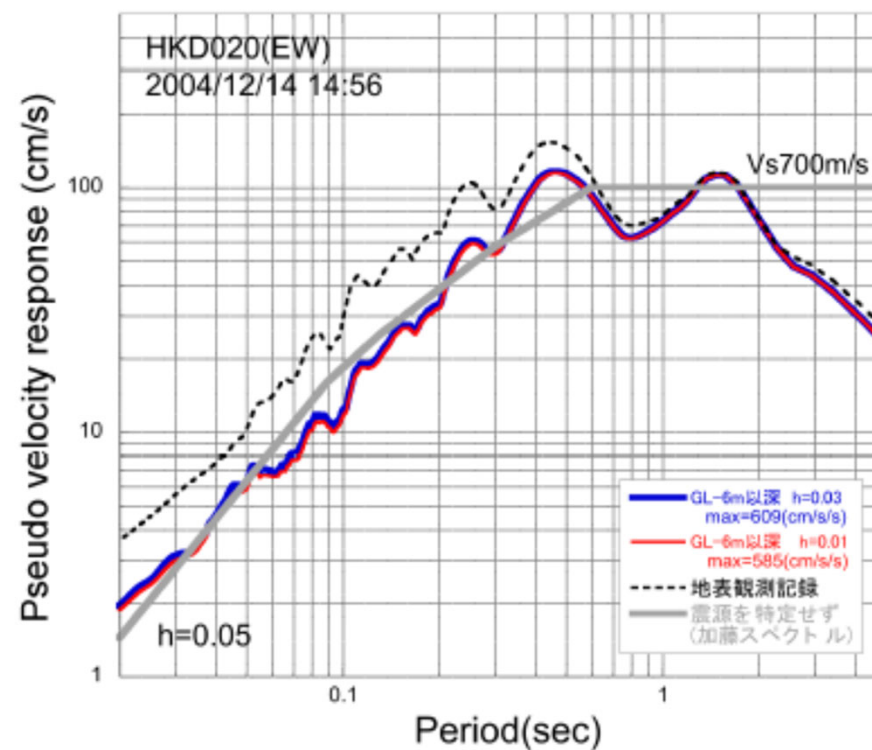
② GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)(2/4)

ii) 基盤地震動評価結果(加速度波形, 応答スペクトル)

- 佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき, GL-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価した結果, 最大加速度は609cm/s²となり, 佐藤ほか(2013)による基盤地震動(585cm/s²)と比較してやや大きく評価されている。また, 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

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (14/19)

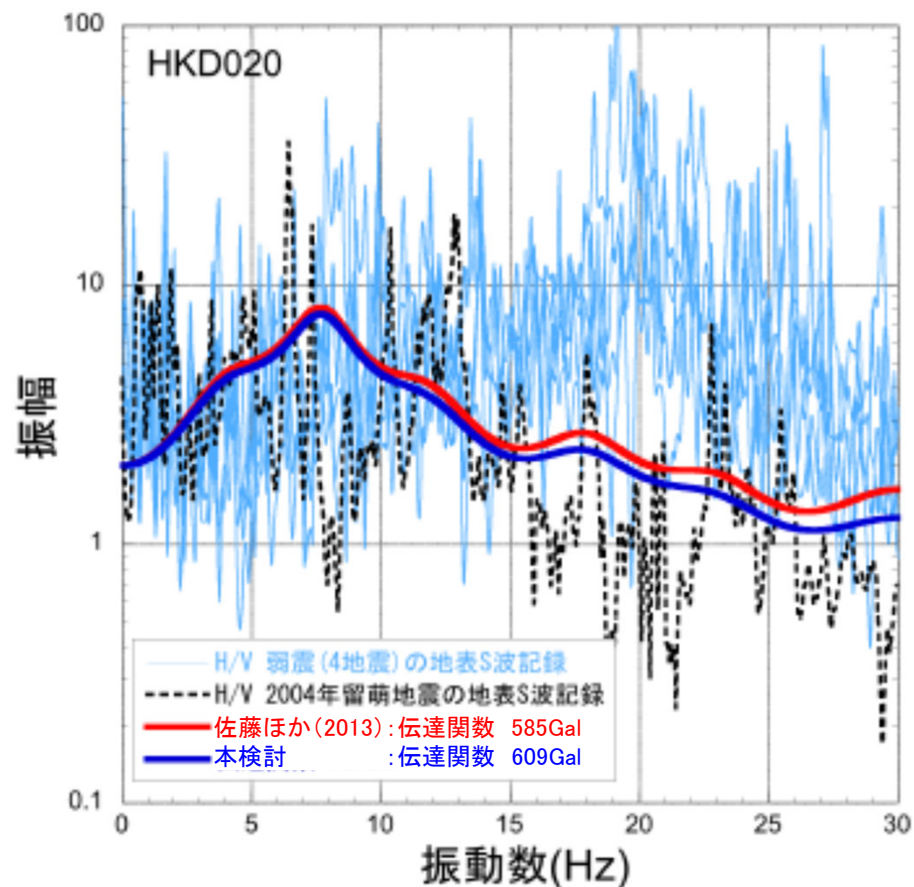


(2) 各種検討 (13/18)

② GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)(3/4)

iii) 基盤地震動評価結果(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。



収束物性値による伝達関数とH/Vスペクトルとの比較

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (15/19)



(2) 各種検討 (14/18)

② GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向) (4/4)

iv) まとめ

- 2004年北海道留萌支庁南部地震におけるHKD020観測点の観測記録について、佐藤ほか(2013)の地盤モデルに基づき、GL-6mまで非線形、GL-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価した。
- GL-6m以深を減衰定数3%として基盤地震動を評価した結果、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)と比較してやや大きく評価された。また、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。
- 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。

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (16/19)

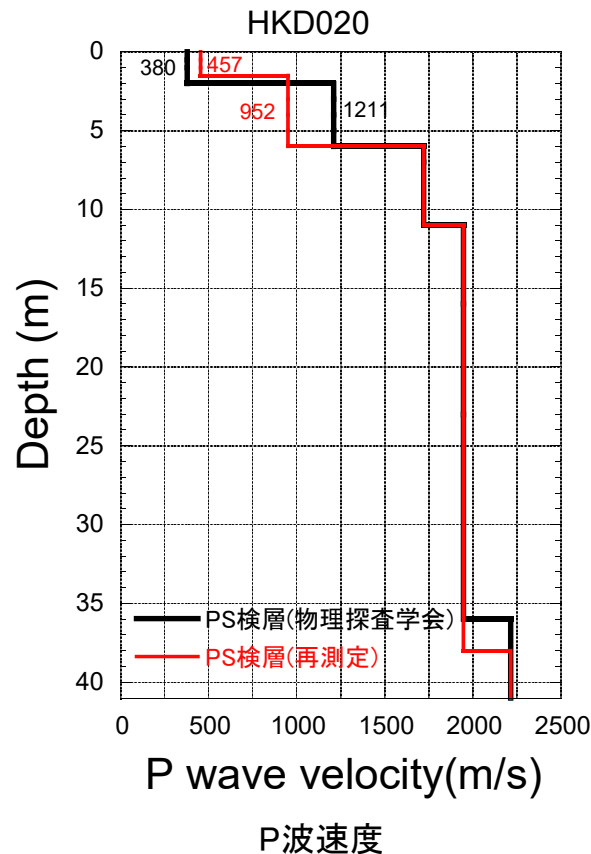


(2) 各種検討 (15/18)

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)(1/3)

i) 地盤モデルの変更

- 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、物理探査学会(2013.10)報告時点での地盤モデルに基づいていたが、表層部分のPS検層結果について笹谷ほか(2008)の位相速度と差異がみられたことから、最表層に重点をおいた再測定を物理探査学会報告後に実施した。
 - 再測定の結果、表層の6m以浅のP波速度は、佐藤ほか(2013)において鉛直方向の基盤地震動を評価した時のモデルとは異なっていたため、P波速度を再設定した地盤モデルを用いて基盤地震動を再評価した。
- ※S波速度は、再測定の結果、佐藤ほか(2013)における地盤モデルとほぼ同様のため変更していない。



3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (17/19)

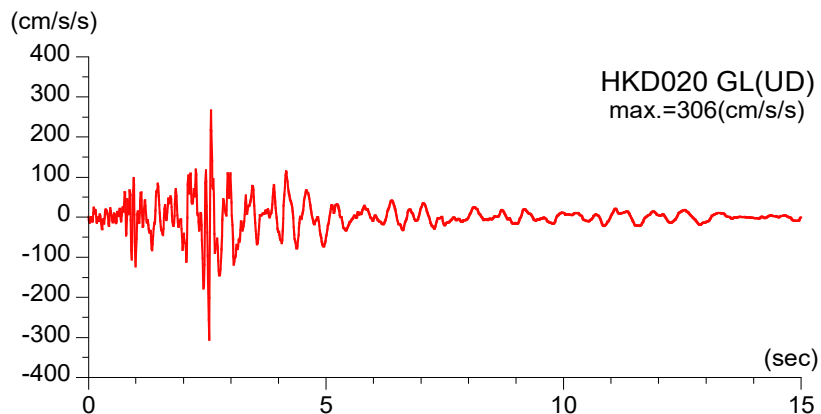


(2) 各種検討 (16/18)

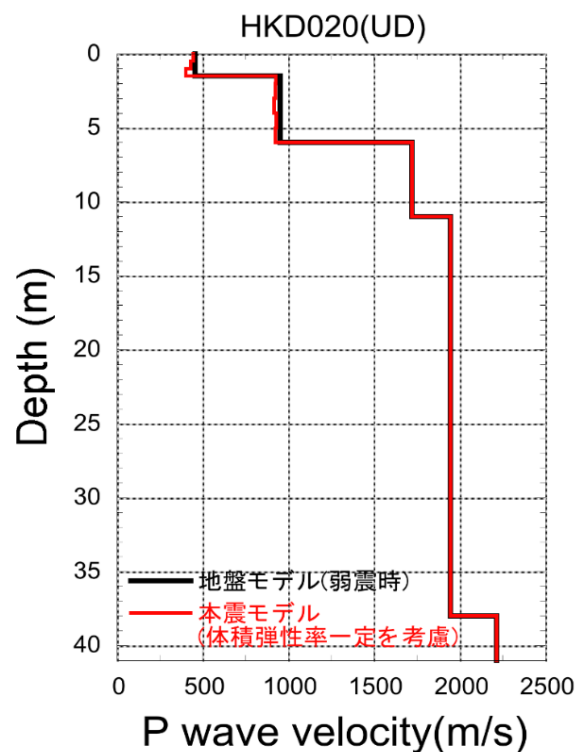
③ 再測定されたPS検層結果を踏まえた基盤地震動評価(鉛直方向)(2/3)

ii) 基盤地震動評価結果

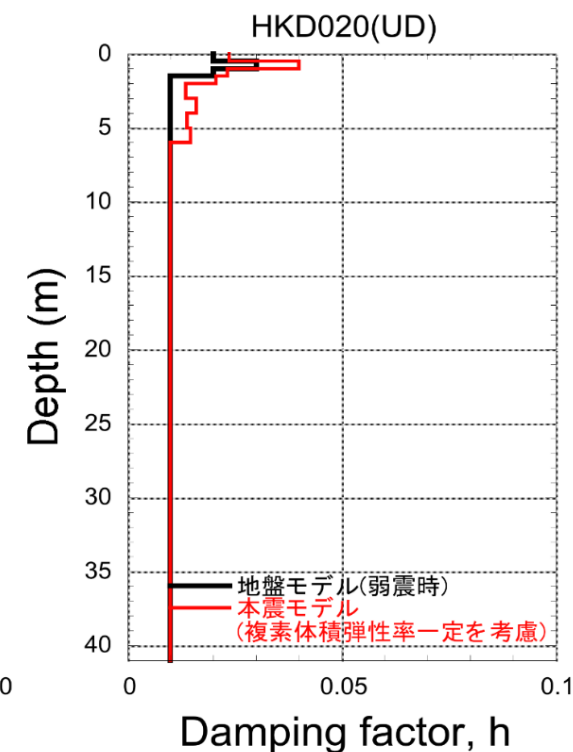
- PS検層の再測定結果を反映した地盤モデルを用い、体積弾性率一定として基盤地震動を評価した結果、最大加速度は 306cm/s^2 であり、佐藤ほか(2013)による基盤地震動(296cm/s^2)と比較すると、やや大きく評価された。



加速度時刻歴波形



P波速度



減衰定数

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (18/19)



(2) 各種検討 (17/18)

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)(3/3)

iii) まとめ

- HKD020観測点のP波速度モデルは、笹谷ほか(2008)の位相速度と差異がみられたことから、最表層に重点をおいて再測定し、その結果を踏まえてP波速度モデルを再設定した。
- 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基盤地震動を評価した結果、最大加速度は 306cm/s^2 であり、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。

3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討 (19/19)



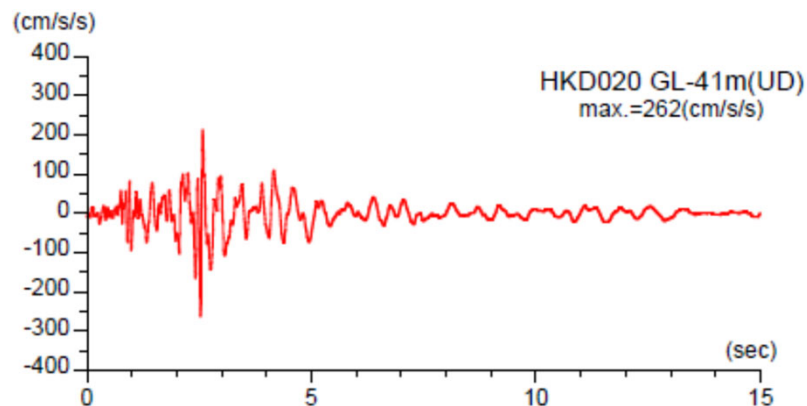
(2) 各種検討 (18/18)

④地下水位の状況を踏まえGL-6mまでポアソン比一定とした基盤地震動評価(鉛直方向)

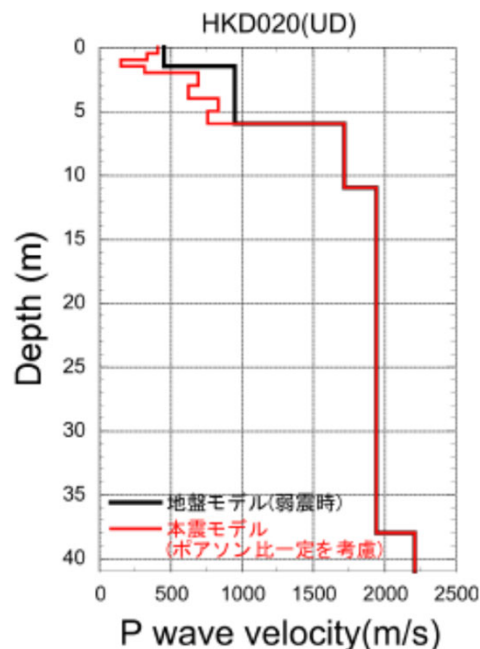
- 佐藤ほか(2013)および表層地盤のPS検層の再測定結果を踏まえた鉛直方向の基盤地震動評価は、体積弾性率一定として評価しているが、地下水位の状況を踏まえ、GL-6mまでポアソン比一定、GL-6m以深を体積弾性率一定とした場合の鉛直方向の基盤地震動を評価した。
- 体積弾性率一定とした場合と比較して、ポアソン比一定とした場合、S波速度の低下に伴ってP波速度も低下するため、最大加速度は262cm/s²となっている。



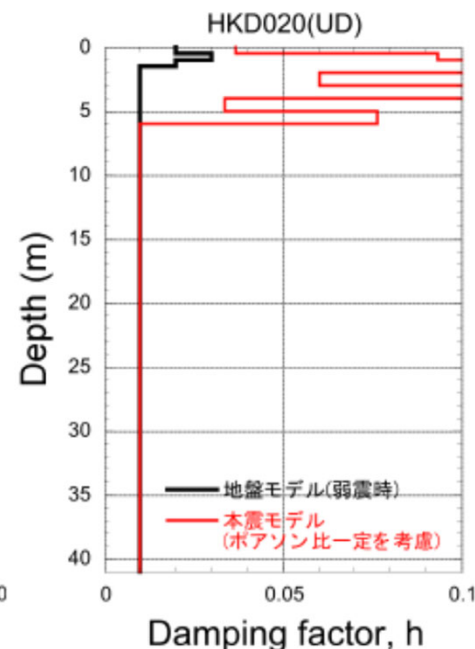
- ポアソン比一定とした場合、最大加速度は262cm/s²となり、③の体積弾性率一定と仮定した結果(306cm/s²)は保守的な結果となっている。



加速度時刻歴波形



P波速度



減衰定数

3.1.4 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

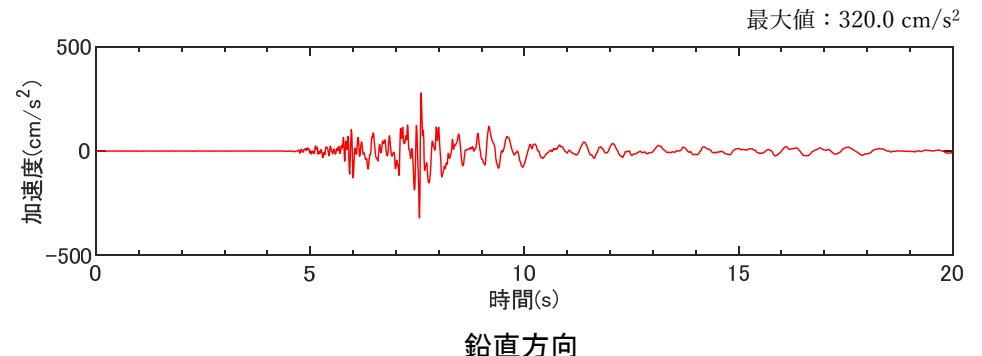
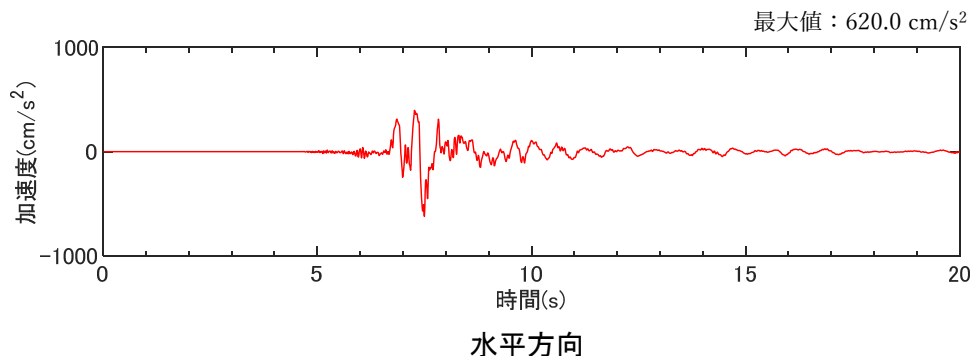


各種検討のまとめ

- 2004年北海道留萌支庁南部地震における佐藤ほか(2013)によるHKD020観測点の基盤地震動の評価結果について、以下の追加調査結果(室内試験及びPS検層再測定)を踏まえた検討等を行い再評価した。
 - GL-41mまで非線形性を考慮した基盤地震動評価(水平方向)
 - GL-6mからGL-41mまで減衰定数を3%とした基盤地震動評価(水平方向)
 - 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)
 - 地下水位の状況を踏まえGL-6mまでポアソン比一定とした基盤地震動評価(鉛直方向)
- 再評価した結果、評価した基盤地震動の最大加速度は、水平方向については②のケース(609cm/s^2)が、鉛直方向については③のケース(306cm/s^2)が最も大きい結果が得られたことから、これら2004年北海道留萌支庁南部地震の基盤地震動を、震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する。

保守性を勘案した基盤地震動の評価

- 震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する、上記の地震動(水平方向 609cm/s^2 、鉛直方向 306cm/s^2)に対して、更なる保守性を勘案して、2004年北海道留萌支庁南部地震の基盤地震動の加速度時刻歴波形を、水平方向 620cm/s^2 、鉛直方向 320cm/s^2 に基準化(位相特性を変えずに振幅特性のみ変更)した地震動として考慮する。



保守性を勘案した基盤地震動の加速度時刻歴波形

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (1/9)



(1) 検討方針(1/2)

- 2004年北海道留萌支庁南部地震の基盤地震動(以下「留萌基盤地震動」という。)の評価位置の V_s は938m/s, V_p は2215m/sとなっている。
- 一方, 大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置※の V_s は860m/s, V_p は2070m/sとなっており, 上記の留萌基盤地震動の評価位置とやや速度値が異なる。
※: 解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として, 鉛直アレイ観測点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。
- このため, V_s , V_p の違いによる地震動への影響について, 以下の補正方法により確認した上で, より保守的な評価となる地震動を, 震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する。
 - ① 地下構造モデルを用いた補正
 - 地下構造モデルは, 次ページに示す統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルを用いることを基本とする。
 - ただし, 深部地下構造モデルには留萌基盤地震動の評価位置の V_s (938m/s), V_p (2215m/s)と同等の速度層がないことから, 同速度に近い速度層について, 地盤物性の深度依存性を踏まえて, $V_s=938\text{m/s}$ 及び $V_p=2215\text{m/s}$ 相当の速度構造区分を設けた, 補正用の地下構造モデルを設定した上で, 補正を行う。
 - ② インピーダンス比による補正
 - 留萌基盤地震動の評価位置と, 大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置との密度 ρ , V_s , V_p の違いを, 波動伝播理論に基づく透過係数を用いて補正する。

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (2/9)

(2) 検討方針(2/2)

- 敷地内の鉛直アレイ地震観測地点においてダウンホール法によるPS検層結果を踏まえて作成した、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルについて、留萌基盤地震動の評価位置の V_s (938m/s)、 V_p (2215m/s)に近いNo.1層を、 V_s 、 V_p の深度依存性に着目した速度構造区分に分割して評価を行う。

統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデル

| 基盤の地震動を 評価する位置※ ▼ (T.P.-230m) | 層No. | 下端標高 T.P. (m) | 層厚 (m) | ρ (t/m^3) | V_s (m/s) | Q_s | V_p (m/s) | Q_p |
|-------------------------------------|------|---------------------|-----------|-----------------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | 1 | -330 | 100 | 1.6 | 860 | 50 | 2070 | 60 |
| | 2 | -820 | 490 | 2.3 | 1700 | 80 | 3500 | 60 |
| | 3 | -1770 | 950 | 2.5 | 2200 | 290 | 4400 | 150 |
| | 4 | -2210 | 440 | 2.7 | 2700 | | 5200 | |
| ▼ 地震基盤 | 5 | - | - | 2.7 | 3200 | 550 | 5400 | 210 |

※: 鉛直アレイ地震観測地点において解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、T.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (3/9)

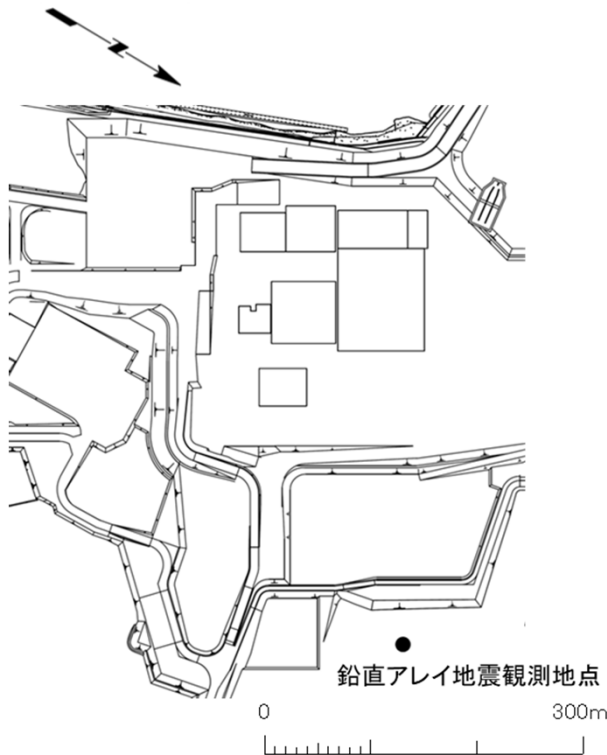


(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討(1/7)

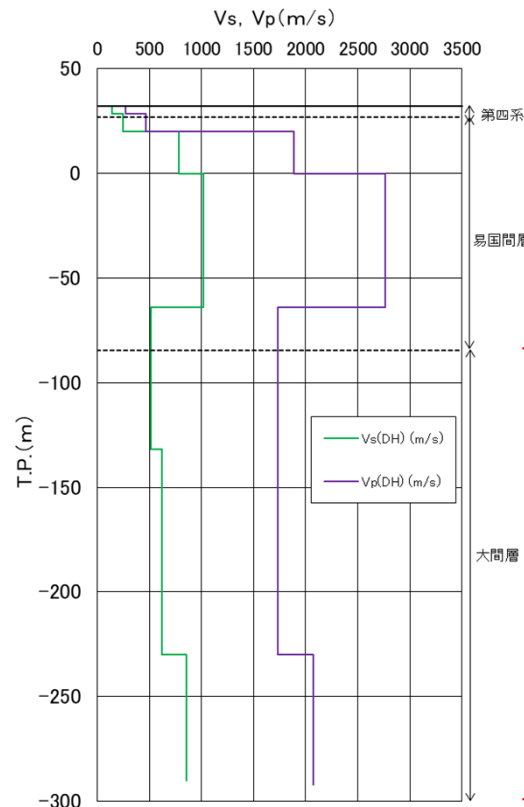
① 地下構造モデルを用いた補正 (1/4)

i) 検討方針

- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルのNo.1層について、 V_s 、 V_p の深度依存性に着目した、詳細な速度構造区分を設定した上で補正を行う。
- 敷地内の鉛直アレイ地震観測地点におけるダウンホール法によるPS検層結果は、大間層の区間において深度依存性が認められることから、深度依存式を作成の上、速度構造区分の細分化を行い、留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルを設定する。



鉛直アレイ地震観測地点の位置



鉛直アレイ地震観測地点でのダウンホール法によるPS検層結果

ダウンホール法によるPS検層結果は、大間層の区間において深度依存性が認められる。



大間層の区間について、深度依存式を作成の上、速度構造区分の細分化を行い、留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルを設定する。

上記の細分化にあたっては、1mごとに速度値が得られており、深度依存性の傾向がより表現されるサスペンション法によるPS検層結果を用いた。

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (4/9)



(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討(2/7)

① 地下構造モデルを用いた補正 (2/4)

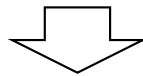
ii) 検討手順

下記のフローの手順に基づき、留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルを設定する。

- 鉛直アレイ地震観測地点の大間層について、サスペンション法によるPS検層結果に基づき、弾性波速度の深度依存式を作成する。
- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルのNo.1層について、上記の深度依存式に基づき、留萌基盤地震動が評価された位置の弾性波速度($V_s=938\text{m/s}$, $V_p=2215\text{m/s}$)を上回る速度となる位置を確認し、この位置で分割することで、留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルを設定する。

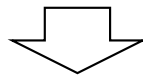
手順1: 弾性波速度の深度依存式の作成

- 鉛直アレイ地震観測地点の大間層について、サスペンション法によるPS検層結果に基づき、弾性波速度(V_s , V_p)の深度依存式を作成する^{※1}。



手順2: 地下構造モデルの分割位置の確認

- 手順1で作成した深度依存式に基づき、留萌基盤地震動が評価された位置の弾性波速度^{※2}を上回る位置を確認する。



手順3: 留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルの設定

- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルのNo.1層について、手順2で確認した位置で分割することで、留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルを設定する。

※1: 深度依存式の作成においてサスペンション法によるPS検層結果の使用にあたり、孔壁の乱れ等による測定値のバラツキを排除し、適切な評価を行うために、PS検層結果を3m区間で移動平均する処理を行った。

※2: 留萌基盤地震動が評価された位置の弾性波速度
 $V_s=938\text{m/s}$
 $V_p=2215\text{m/s}$

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (5/9)



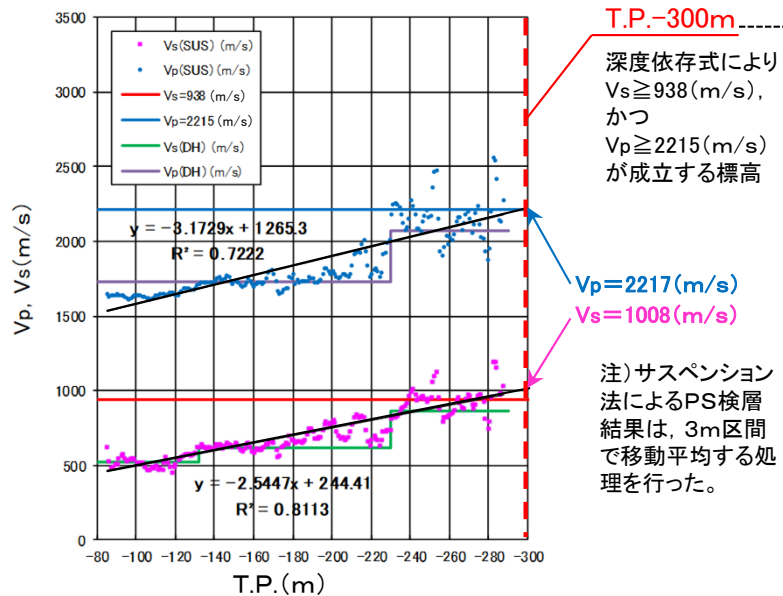
(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討(3/7)

① 地下構造モデルを用いた補正 (3/4)

iii) 補正に用いる地下構造モデルの設定

- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルのNo.1層について、サスペンション法によるPS検層結果に基づく深度依存式により、留萌基盤地震動が評価された位置の弾性波速度 ($V_s=938\text{m/s}$, $V_p=2215\text{m/s}$) を上回る速度となる位置で分割した。
- 当該位置に、保守性を勘案した基盤地震動を入力し、大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置^{※1}における地震動を評価する。
^{※1}: 解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、鉛直アレイ観測点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。

手順1: 弾性波速度の深度依存式の作成



→ 深度依存式は、以下の通りとする。

$$V_s = -2.5447 \times (\text{標高T.P.m}) + 244.41$$

$$V_p = -3.1729 \times (\text{標高T.P.m}) + 1265.3$$

手順2: 地下構造モデルの分割位置の確認

- 標高T.P.-300(m)のとき、深度依存式によると、 $V_s=1008\text{m/s}$, $V_p=2217\text{m/s}$ となり、 $V_s \geq 938\text{m/s}$, かつ $V_p \geq 2215\text{m/s}$ が成立する。

→ 地下構造モデルの分割位置をT.P.-300(m)に設定する。

手順3: 留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデルの設定

統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデル

| 層No. | 下端標高 T.P. (m) | 層厚 (m) | ρ (t/m^3) | V_s (m/s) | Q_s | V_p (m/s) | Q_p |
|------|---------------|--------|---------------------------|-------------|-------|-------------|-------|
| 1 | -330 | 100 | 1.6 | 860 | 50 | 2070 | 60 |
| 2 | -820 | 490 | 2.3 | 1700 | 80 | 3500 | 60 |
| 3 | -1770 | 950 | 2.5 | 2200 | 290 | 4400 | 150 |
| 4 | -2210 | 440 | 2.7 | 2700 | | 5200 | |
| 5 | - | - | 2.7 | 3200 | 550 | 5400 | 210 |

留萌基盤地震動の補正に用いる地下構造モデル^{※2}

| 層 No. | 下端標高 T.P. (m) | 層厚 (m) | ρ (t/m^3) | V_s (m/s) | V_p (m/s) |
|------------|---------------|--------|---------------------------|-------------|-------------|
| 地震動を評価する位置 | -230 | - | - | - | - |
| 1-1 | -300 | 70 | 1.6 | 860 | 2070 |
| 1-2 | -330 | 30 | 1.6 | 1008 | 2217 |
| 2層以深 | 2層以深については省略 | | | | |

※2: Q_s と Q_p は統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルの1層目の値を使用する。

2層に分割

入力位置

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (6/9)



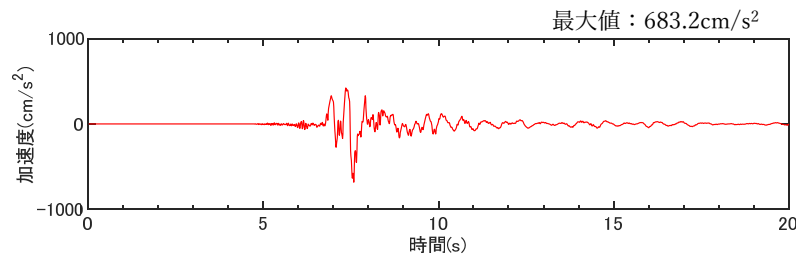
(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討 (4/7)

① 地下構造モデルを用いた補正 (4/4)

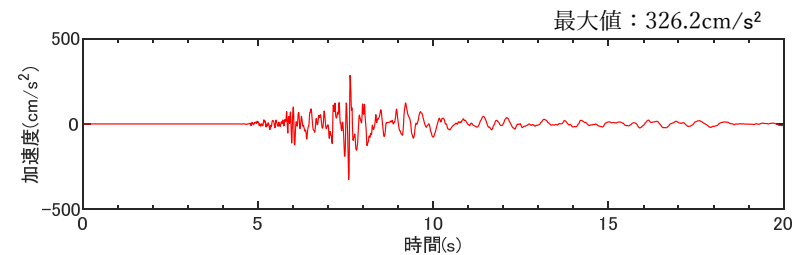
iv) 解放基盤表面における地震動の評価

- 地下構造モデルを用いて評価した大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置※における地震動の最大加速度は、水平方向 683.2cm/s²、鉛直方向 326.2cm/s²となった。

※:解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、鉛直アレイ観測点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。

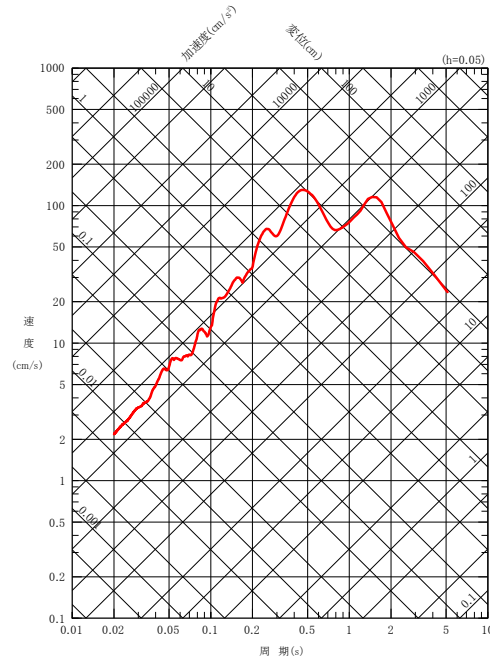


水平方向

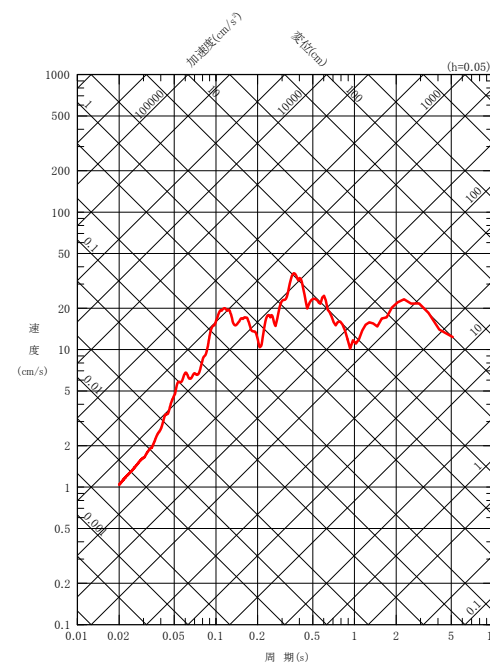


鉛直方向

加速度時刻歴波形



水平方向



鉛直方向

応答スペクトル

大間原子力発電所の地盤物性を考慮した地震動 (地下構造モデルを用いた補正)

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (7/9)



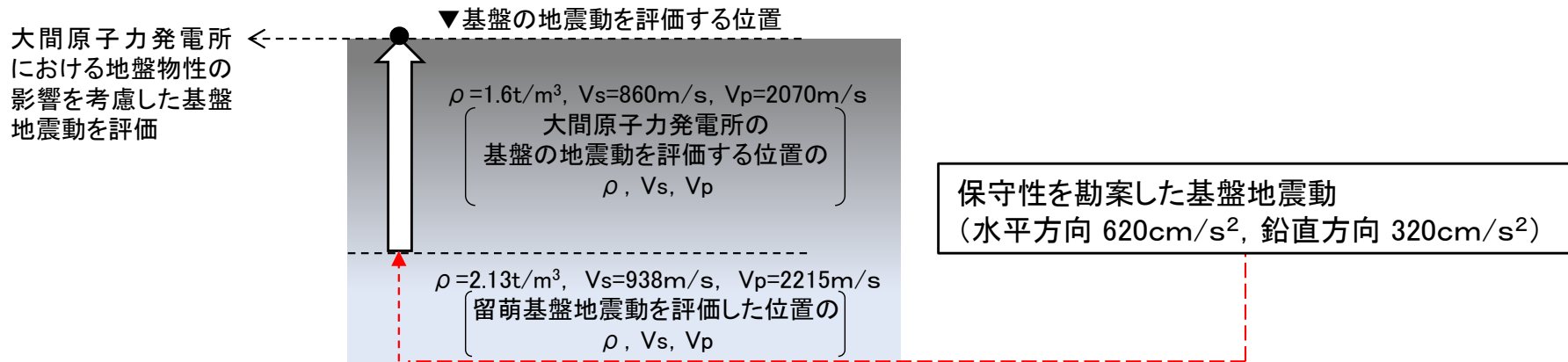
(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討 (5/7)

② インピーダンス比による補正 (1/2)

i) 検討方針

- 大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置*と、HKD020観測点の留萌基盤地震動の評価位置との密度及び弾性波速度の違いによる地震動への影響について、弾性体の波動伝播理論に基づく透過係数を用いて評価する。

*: 解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、鉛直アレイ観測点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。



【透過係数に基づいたHKD020観測点の基盤地震動の補正】

$$\text{波動インピーダンス比 } \alpha = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1}, \text{ 透過係数 } \gamma = \frac{2}{1 + \alpha}$$

ここで ρ_1 , V_1 はHKD020観測点のGL-41mの基盤層の密度と弾性波速度 ($\rho = 2.13\text{t/m}^3$, $V_s = 938\text{m/s}$, $V_p = 2215\text{m/s}$)

ρ_2 , V_2 は大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置の密度と弾性波速度 ($\rho = 1.6\text{t/m}^3$, $V_s = 860\text{m/s}$, $V_p = 2070\text{m/s}$)

したがって、

水平方向の最大加速度は $620 \times 1.184 = 734.1\text{cm/s}^2$, 鉛直方向の最大加速度は $320 \times 1.175 = 376.0\text{cm/s}^2$ となる。

3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (8/9)

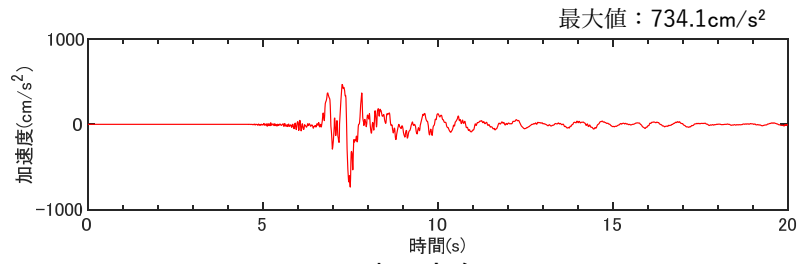


(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討 (6/7)

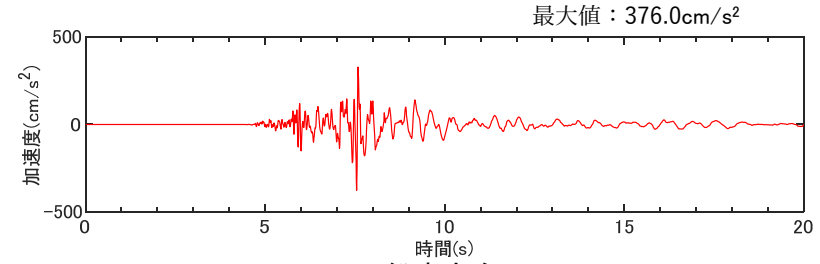
② インピーダンス比による補正 (2/2)

ii) 解放基盤表面における地震動評価

• 透過係数を用いて評価した大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置※における地震動の最大加速度は、水平方向 734.1 cm/s²、鉛直方向 376.0 cm/s²となった。
 ※: 解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、鉛直アレイ観測点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。

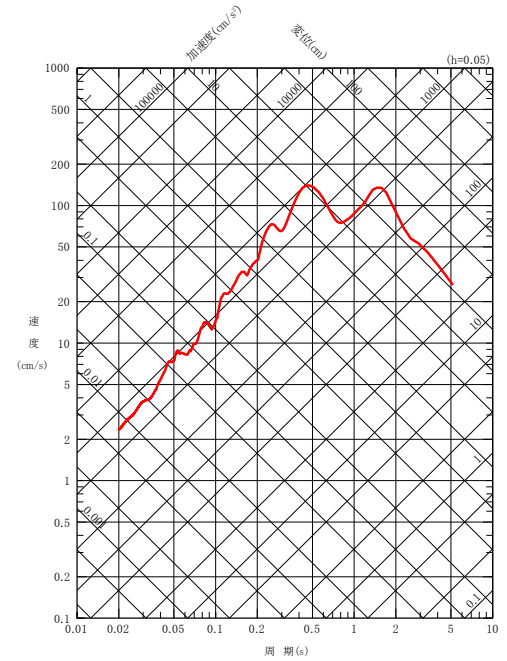


水平方向

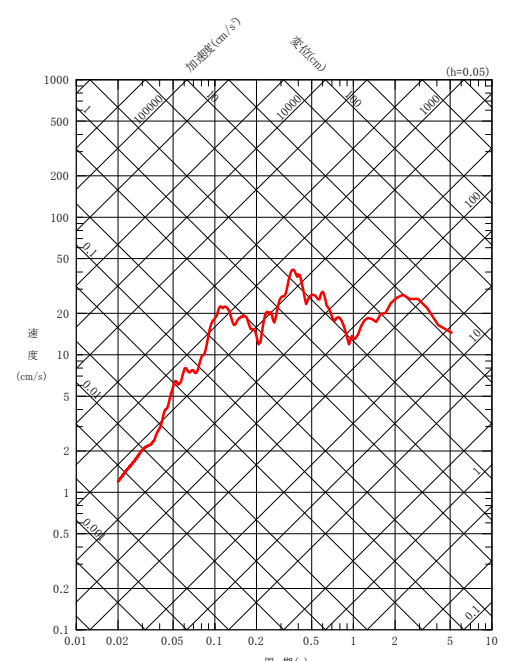


鉛直方向

加速度時刻歴波形



水平方向



鉛直方向

応答スペクトル

大間原子力発電所の地盤物性を考慮した地震動 (インピーダンス比による補正)

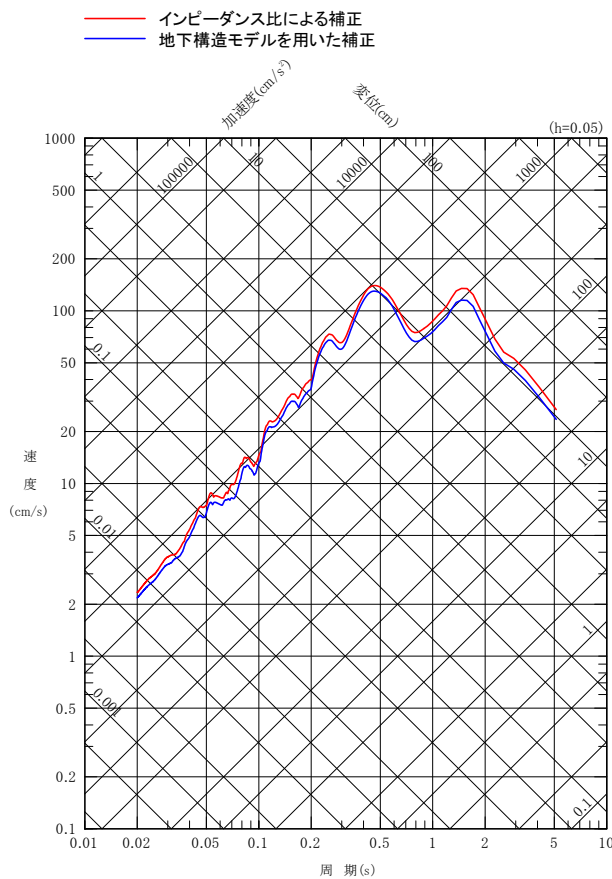
3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正 (9/9)



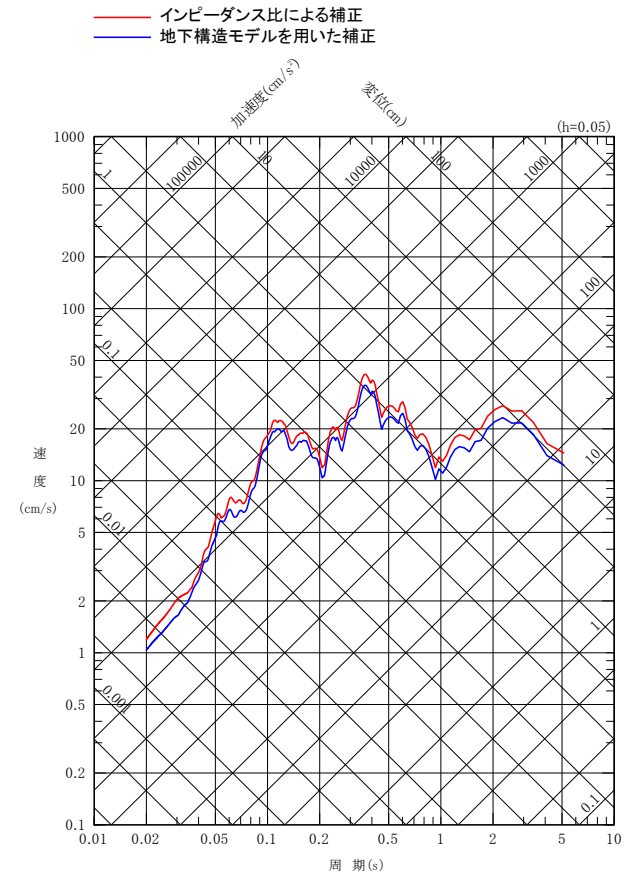
(2) 大間原子力発電所の地盤物性を考慮した検討 (7/7)

③ まとめ

- 留萌基盤地震動の評価位置と、大間原子力発電所の基盤の地震動を評価する位置との地盤物性の違いによる地震動への影響について、大間原子力発電所の深部地下構造モデルに基づく補正用の地下構造モデルを用いて補正した場合と、インピーダンス比により補正した場合について比較した結果、後者の方がより保守的な評価となった。
- 以上を踏まえ、インピーダンス比による補正結果を、震源を特定せず策定する地震動の評価に反映する。



水平方向



鉛直方向

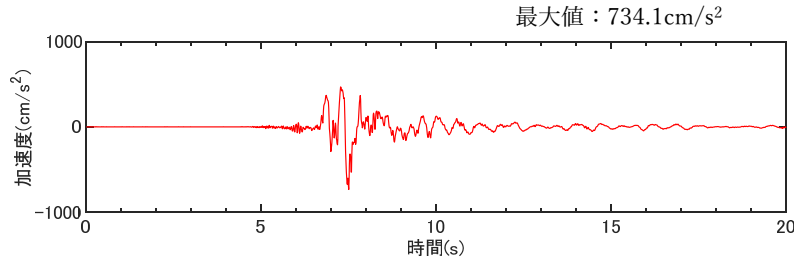
大間原子力発電所の地盤物性を考慮した地震動の応答スペクトルの比較

3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動

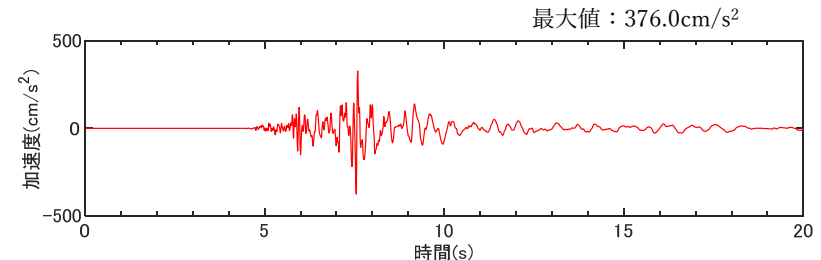


2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

• 2004年北海道留萌支庁南部地震の基盤地震動について、佐藤ほか(2013)以降の追加調査結果を踏まえた検討等による再評価、及び更なる保守性を勘案した評価を行った上で、大間原子力発電所の地盤物性との違いを補正した地震動(水平方向734.1cm/s², 鉛直方向376.0cm/s²)を、震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

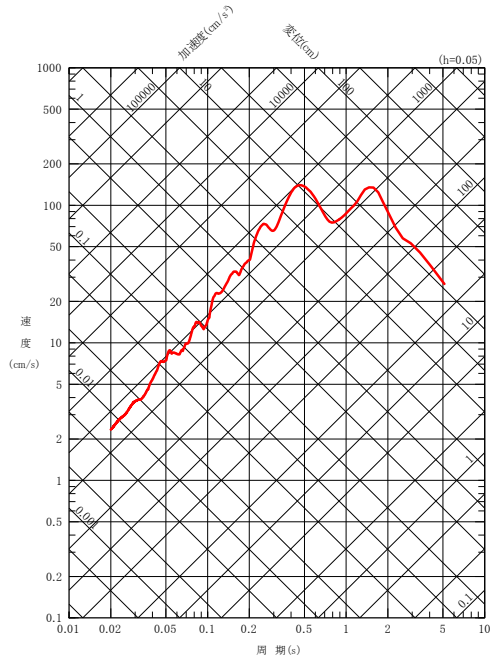


水平方向

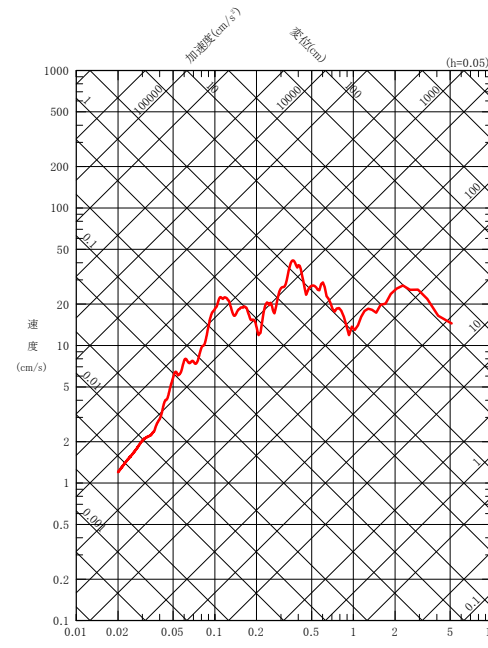


鉛直方向

加速度時刻歴波形



水平方向



鉛直方向

応答スペクトル

目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

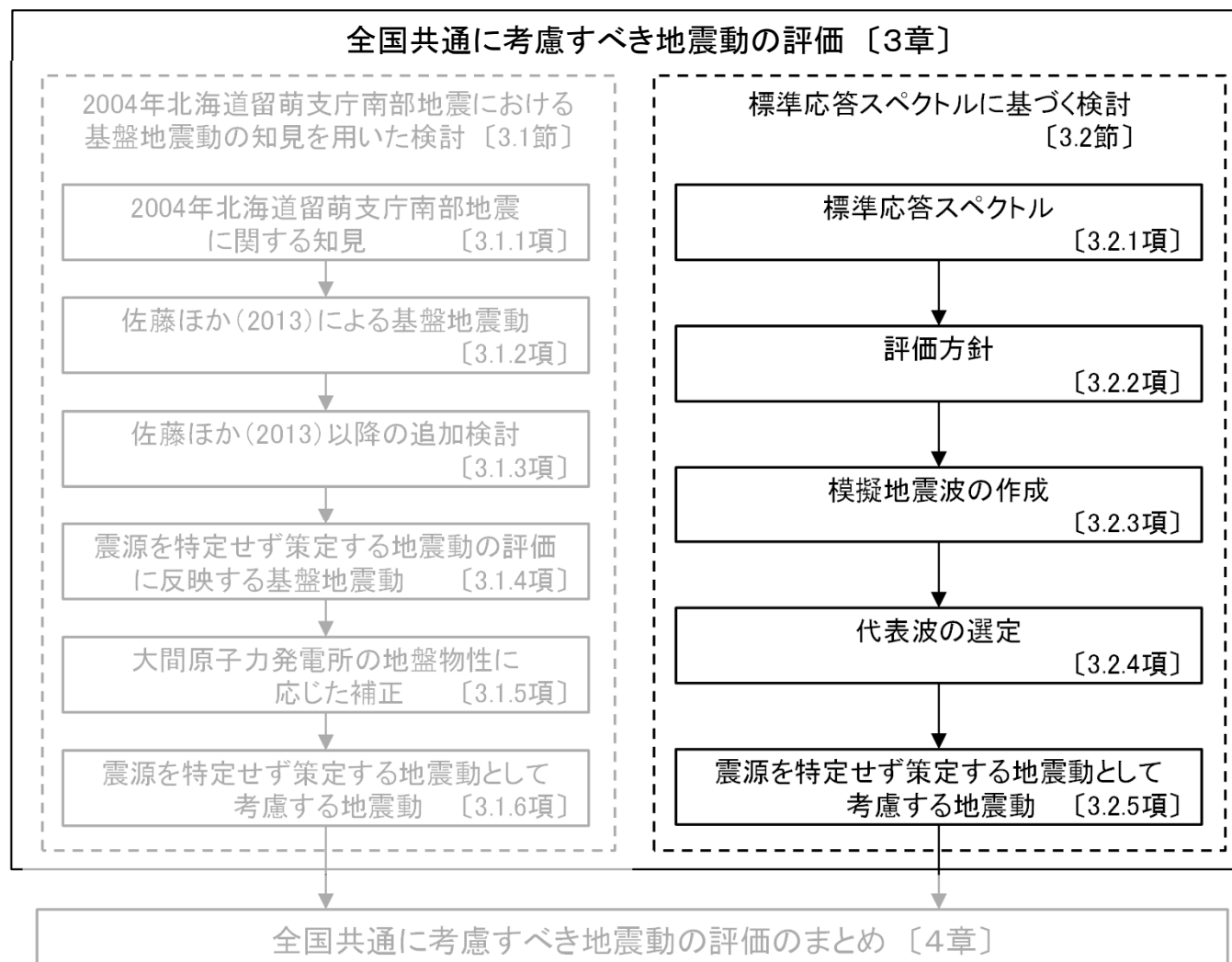
- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

本節の説明箇所

- 本節において、「標準応答スペクトルに基づく検討」について説明する。
- 標準応答スペクトルに基づき、地震基盤相当位置において複数の方法により作成した模擬地震波から代表波を選定した上で、解放基盤表面において震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動を評価する。



全国共通に考慮すべき地震動の評価の検討フロー

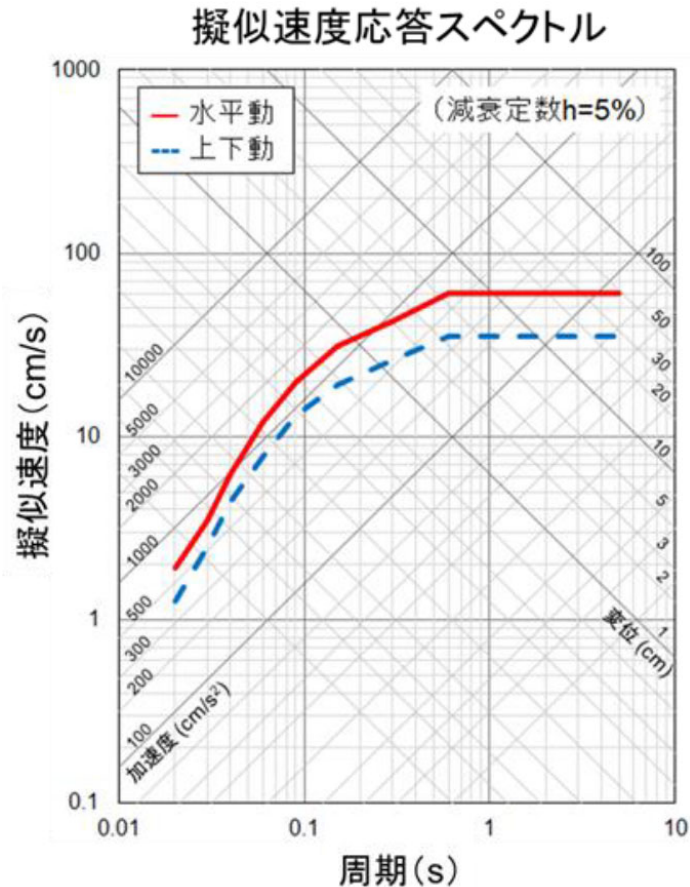
3.2.1 標準応答スペクトル



標準応答スペクトルの概要

- 標準応答スペクトルは、「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)」により、以下のように定められている。

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。



コントロールポイント

| 周期 (s) | 水平動 | 上下動 |
|--------|-------------|-------------|
| | 擬似速度 (cm/s) | 擬似速度 (cm/s) |
| 0.02 | 1.910 | 1.273 |
| 0.03 | 3.500 | 2.500 |
| 0.04 | 6.300 | 4.400 |
| 0.06 | 12.000 | 7.800 |
| 0.09 | 20.000 | 13.000 |
| 0.15 | 31.000 | 19.000 |
| 0.30 | 43.000 | 26.000 |
| 0.60 | 60.000 | 35.000 |
| 5.00 | 60.000 | 35.000 |

3.2.2 評価方針 (1/2)



(1) 検討の手順

- 地震基盤相当面において、標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成する。
- 模擬地震波は、地震動の継続時間及び経時的变化等について複数の方法として、正弦波の重ね合わせによる位相(以下「一様乱数位相」という。)を用いる方法、及び実観測記録位相を用いる方法について検討を行う。
- 複数の方法により作成した模擬地震波から、応答スペクトル及び加速度時刻歴波形の比較により、代表波を選定する。
- 選定した代表波を用いて、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき、大間原子力発電所の解放基盤表面において、震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動を評価する。

【模擬地震波の作成】 [3.2.3項]

- 地震基盤相当面における複数の方法による検討
 - 一様乱数位相を用いる方法
 - 実観測記録位相を用いる方法



【代表波の選定】 [3.2.4項]

- 応答スペクトル及び加速度時刻歴波形の比較



【震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動の評価】 [3.2.5項]

- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき、解放基盤表面における地震動の評価

検討の手順

3.2.2 評価方針 (2/2)

(2) 評価に用いる深部地下構造モデル

- 解放基盤表面における地震動は、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき、基盤の地震動を評価する位置において評価する※1。
- 入力位置は、標準応答スペクトルが策定されている地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$) と同じ速度となるNo.3層の上面位置とする。

※1: 鉛直アレイ地震観測地点におけるT.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定し、この位置で評価した地震動を、重要な安全機能を有する施設の基礎地盤の解放基盤表面(T.P.-260m)における地震動(以下「解放基盤表面における地震動」という。)として適用する。

統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデル

| 基盤の地震動を 評価する位置※2 ▼ (T.P.-230m) | 層No. | 下端標高 T.P. (m) | 層厚 (m) | ρ (t/m^3) | V_s (m/s) | Q_s | V_p (m/s) | Q_p |
|--------------------------------------|------|---------------------|-----------|------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|
| | 1 | -330 | 100 | 1.6 | 860 | 50 | 2070 | 60 |
| ▼ 地震基盤相当面 | 2 | -820 | 490 | 2.3 | 1700 | 80 | 3500 | 60 |
| | 3 | -1770 | 950 | 2.5 | 2200 | 290 | 4400 | 150 |
| | 4 | -2210 | 440 | 2.7 | 2700 | | 5200 | |
| | 5 | — | — | 2.7 | 3200 | 550 | 5400 | 210 |

← 入力位置

※2: 鉛直アレイ地震観測地点において解放基盤表面の地震動を適切に評価できる位置として、T.P.-230m位置を基盤の地震動を評価する位置に設定。

3.2.3 模擬地震波の作成 (1/7)



(1) 模擬地震波の作成方針

- 模擬地震波の作成にあたっては、「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)」への適合性を確認するため、審査ガイドの記載を踏まえ、複数の方法について検討を行う。
- 複数の方法として、一様乱数位相を用いる方法の他、敷地で得られた観測記録を重視して、敷地における実観測記録位相を用いる方法について検討を行う。

○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) 第4条第5項第三号

- ④ 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、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性を適切に考慮すること。

| 審査ガイドの記載 | 大間原子力発電所における検討 |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 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。 | <p>複数の方法として、以下を検討。</p> <p>① 一様乱数位相を用いる方法</p> <ul style="list-style-type: none"> • 地震動の継続時間及び経時的変化は、Noda et al.(2002)に基づき設定。 <p>② 実観測記録位相を用いる方法</p> <ul style="list-style-type: none"> • 地震動の継続時間及び経時的変化は、敷地で得られた観測記録の位相を用いる。 |

3.2.3 模擬地震波の作成 (2/7)



(2) 一様乱數位相を用いる方法 (1/2) 作成方法

- 模擬地震波の作成にあたっては、標準応答スペクトルを目標スペクトルとし、一様乱數位相を用いる方法により模擬地震波を作成する。
- 振幅包絡線はNoda et al.(2002)に基づくこととし、そのパラメータである地震規模M及び等価震源距離 X_{eq} は以下の設定とした。
M: 地震学的知見を参照し、M6.9※¹とする。
 X_{eq} : 敷地周辺の地震発生深さ分布※²を踏まえ、10kmとする。

※1: 地震学的知見として、スケーリング則を踏まえた規模を参照した。

- 地表に明瞭な痕跡が見られない地震の規模は、断層幅が地震発生層を飽和することによりスケーリング則が変わる閾値とされている、 $M_0=7.5E+18N \cdot m$ (Mw6.5相当, M7.0)未滿と考えられるため、M6.9とした。
(一様乱數位相を用いた模擬地震波の作成に関して、振幅包絡線の設定におけるMの値について、2021年10月補正申請においてM6.9としているが、先行地点の審査を踏まえ、保守性の観点からM7.0とした評価結果を示す予定。)

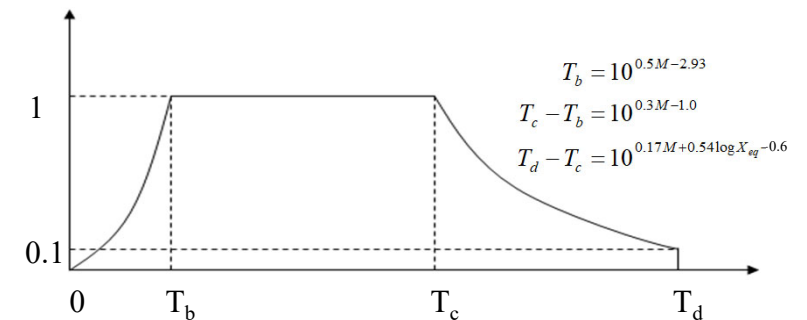
※2: 敷地周辺の微小地震の震源深さ分布のD10及びD90の中央深さを参照した。

(D10及びD90の値は、第1013回審査会合 資料1-1 「3.1 地震発生層の設定」を参照。)

敷地周辺の微小地震の震源深さ分布

| 評価 | D10% | D90% | 中央深さ |
|--------------------------------|-------|--------|-------|
| 原子力安全基盤機構(2004)による評価 | 6.2km | 13.8km | 約10km |
| 気象庁の一元化震源に基づく評価 | 7.4km | 14.6km | 約11km |
| As-net※ ³ の震源に基づく評価 | 5.8km | 13.4km | 約10km |

※3: 公益財団法人 地震予知総合研究振興会による、青森県を中心に展開している高密度地震観測網。



Noda et al.(2002)の振幅包絡線

振幅包絡線の諸元値

| 諸元 | 値 |
|-----------------|--------|
| 地震規模M | 6.9 |
| 等価震源距離 X_{eq} | 10km |
| T_b | 3.31s |
| T_c | 15.06s |
| T_d | 28.03s |

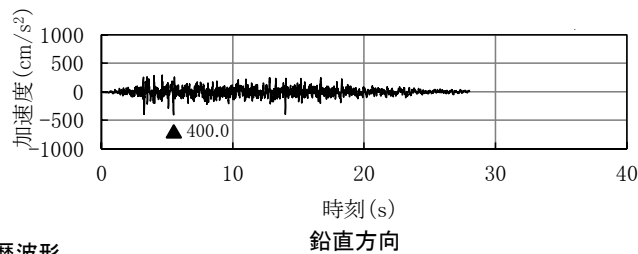
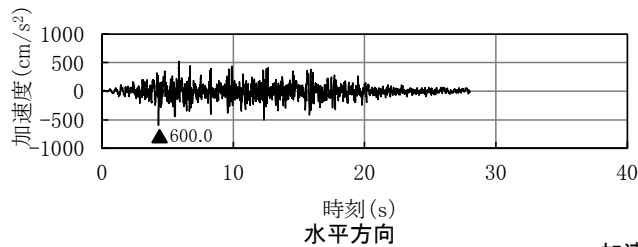
3.2.3 模擬地震波の作成 (3/7)



(2) 一様乱數位相を用いる方法 (2/2)

模擬地震波の作成結果

- 標準応答スペクトルを目標スペクトルとし、一様乱數位相を用いる方法により模擬地震波を作成した。*
- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)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の比が全周期帯で0.85以上
 - 応答スペクトルの強度値の比(SI比)が1.0以上

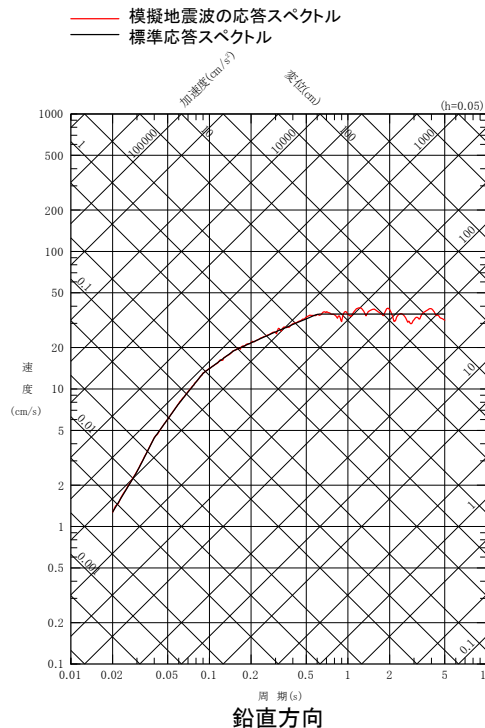
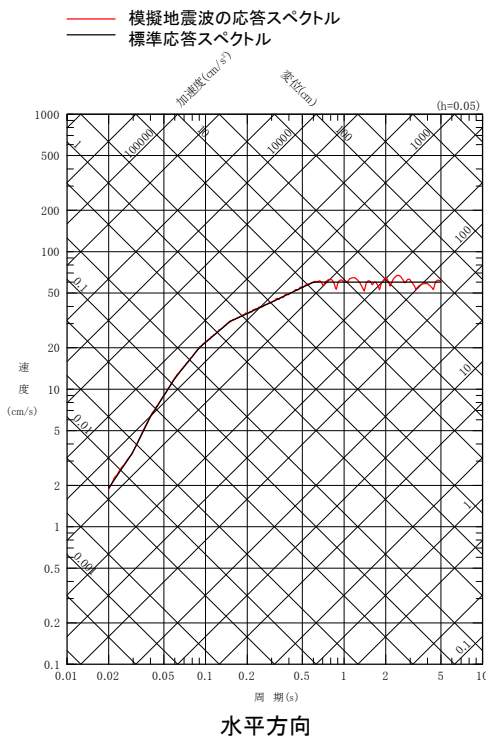


加速度時刻歴波形

※: 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づく、解放基盤表面における地震動の評価結果は、巻末の(補足1)参照。

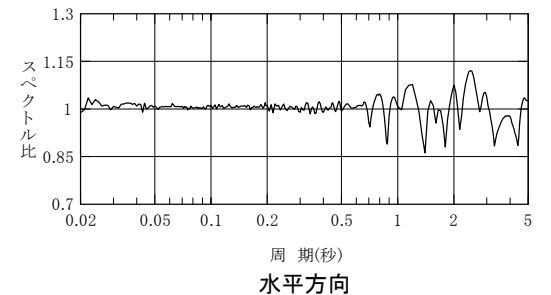
適合状況

| | 最大加速度 (cm/s ²) | 継続時間 (s) | SI比 | 最小応答 スペクトル比 |
|------|-------------------------------|-------------|------|----------------|
| 水平方向 | 600.0 | 28.03 | 1.01 | 0.86 |
| 鉛直方向 | 400.0 | 28.03 | 1.02 | 0.85 |

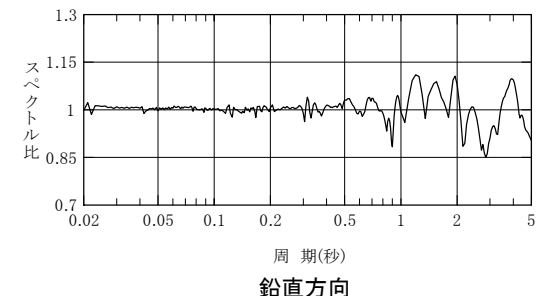


応答スペクトル

鉛直方向



水平方向



鉛直方向

スペクトル比

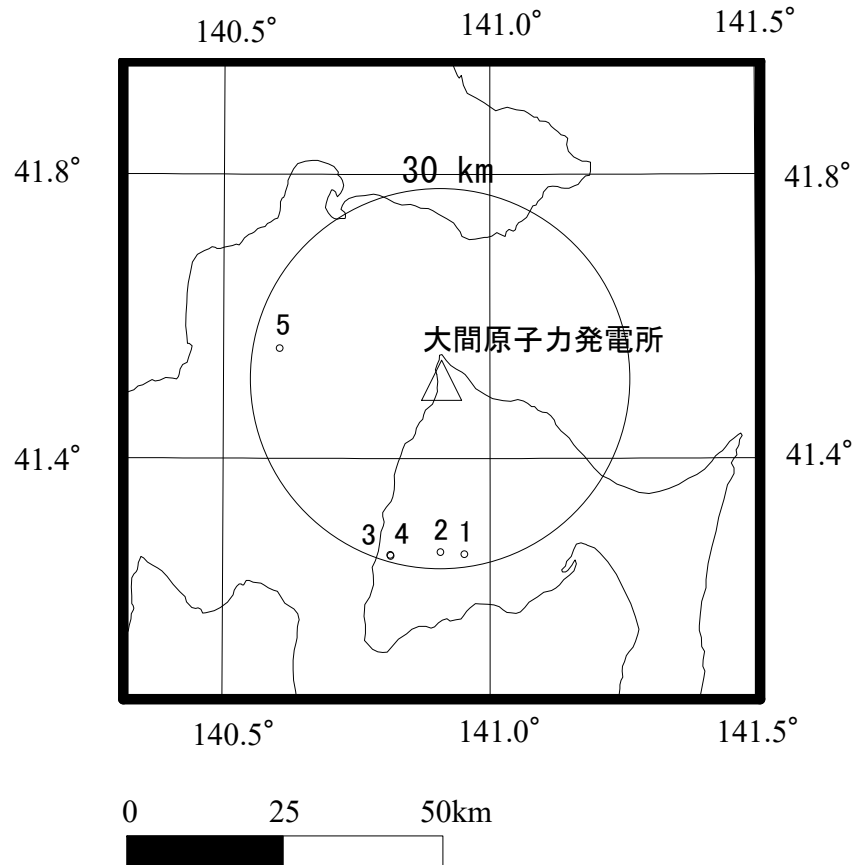
一様乱數位相を用いる方法による模擬地震波の作成結果

3.2.3 模擬地震波の作成 (4/7)



(3) 実観測記録位相を用いる方法 (1/4) 検討対象観測記録

- 敷地の観測記録については、敷地近傍の地震に対する敷地地盤における地震動の振動特性(位相特性)を有していると考えられる地震を選定するため、下記の抽出条件により、確認対象地震を選定した。
- 地震観測記録は、敷地内の鉛直アレイ地震観測点の最も深いT.P.-207.5m地点の地震計位置とする。
- 下記の条件で抽出される地震のうち、ノイズ影響のない観測記録の中から最大加速度が最も大きい記録である、「2004年9月8日の地震(M3.7)」を選定した。詳細については、巻末の(補足2)参照。



抽出条件

- 観測点 : サイト内鉛直アレイ観測点
- 観測期間 : 1989年8月～2019年12月
- 震央距離 : 30km以内
- 震源深さ : 0～20km
- メカニズム : 指定なし
- M : 4.0程度以上※

※: M4.0以上の地震は1地震のみのため、Mの範囲を拡張し、上位5地震を抽出した。

検討に用いる地震観測記録の選定

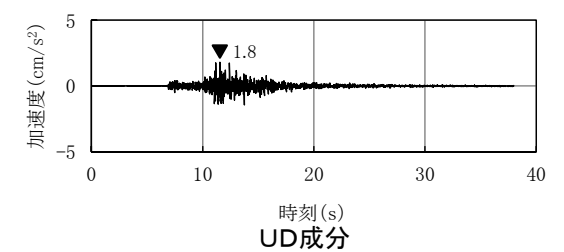
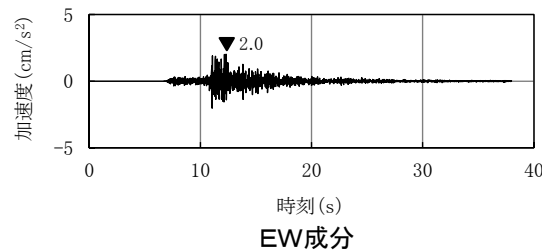
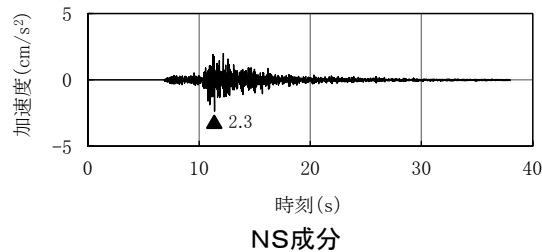
| No. | 発生日時 | 震央位置 | | M | 震央距離 (km) | 震源深さ (km) |
|-----|------------------|--------|---------|-----|--------------|--------------|
| | | 北緯(°) | 東経(°) | | | |
| 1 | 1993.02.11 03:51 | 41.263 | 140.955 | 3.7 | 28 | 13 |
| 2 | 1998.10.18 01:08 | 41.266 | 140.910 | 4.1 | 27 | 12 |
| 3 | 2004.09.04 11:18 | 41.262 | 140.816 | 3.8 | 29 | 14 |
| 4 | 2004.09.08 20:59 | 41.261 | 140.817 | 3.7 | 29 | 12 |
| 5 | 2016.09.25 13:03 | 41.553 | 140.608 | 3.7 | 26 | 13 |

選定した地震

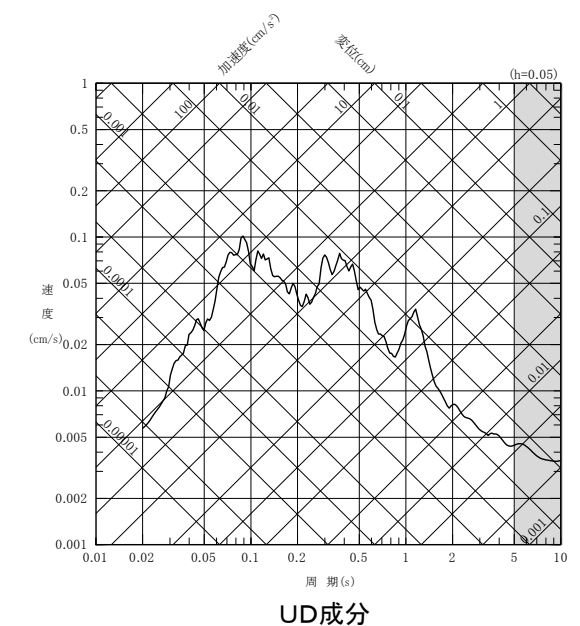
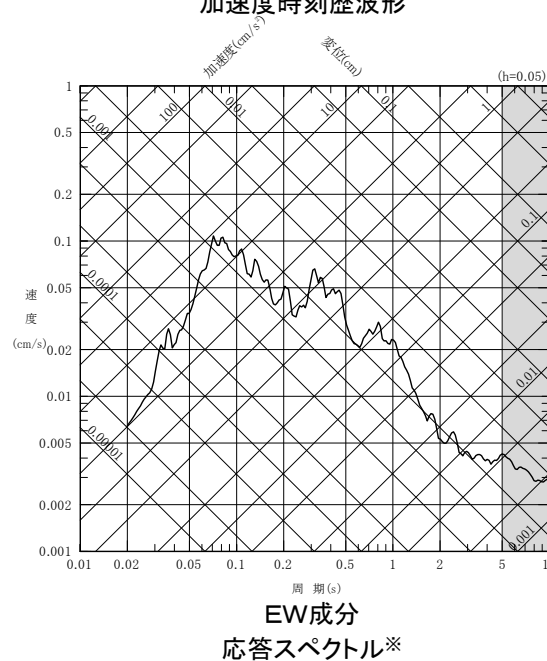
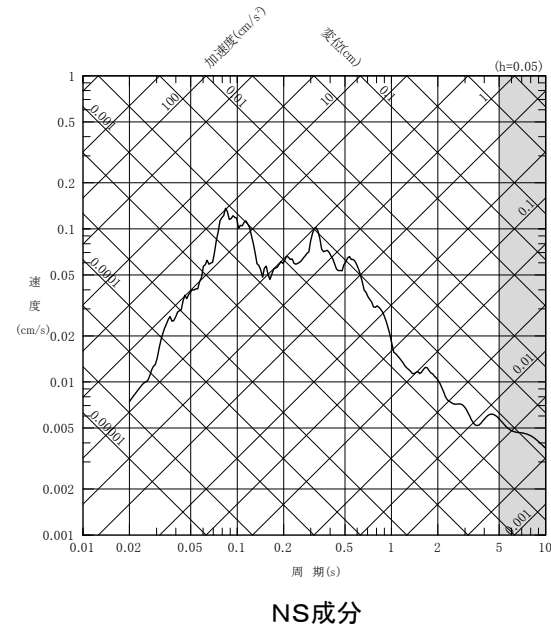
(3) 実観測記録位相を用いる方法 (2/4)

選定した観測記録

- ・実観測記録位相を用いる方法に適用する、敷地で得られた観測記録の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。
- ・観測記録にはノイズ影響が見られず、S波到達以降、10秒間程度、有意な振幅を有する波形が得られている。



加速度時刻歴波形



2004年9月8日の地震(M3.7)の観測記録
(敷地内の鉛直アレイ観測点 T.P.-207.5m位置, 地中波)

※: 応答スペクトルの周期5秒以上は、地震計の感度がやや低下するが、ノイズ影響を見やすくするために参考として示す。

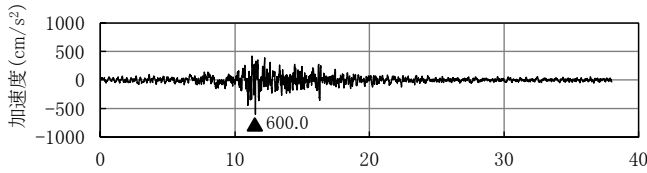
3.2.3 模擬地震波の作成 (6/7)



(3) 実観測記録位相を用いる方法 (3/4)

模擬地震波の作成結果 (1/2) (水平方向)

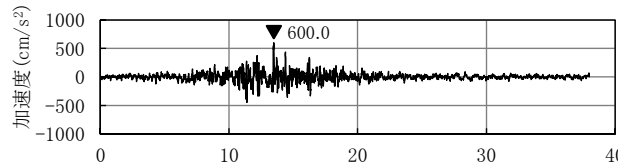
- 標準応答スペクトルを目標スペクトルとし、2004年9月8日の地震(M3.7)において敷地で得られた観測記録位相を用いて、模擬地震波を作成した。*
- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認した。
 - 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトルの比が全周期帯で0.85以上
 - 応答スペクトルの強度値の比(SI比)が1.0以上



時刻(s)
NS成分

— 模擬地震波の応答スペクトル
— 標準応答スペクトル

加速度時刻歴波形



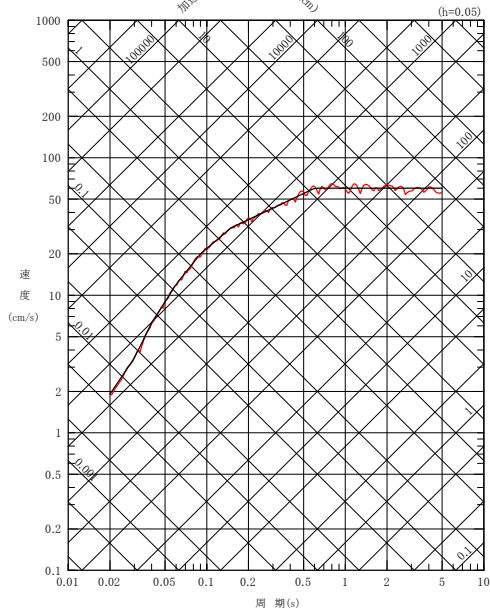
時刻(s)
EW成分

— 模擬地震波の応答スペクトル
— 標準応答スペクトル

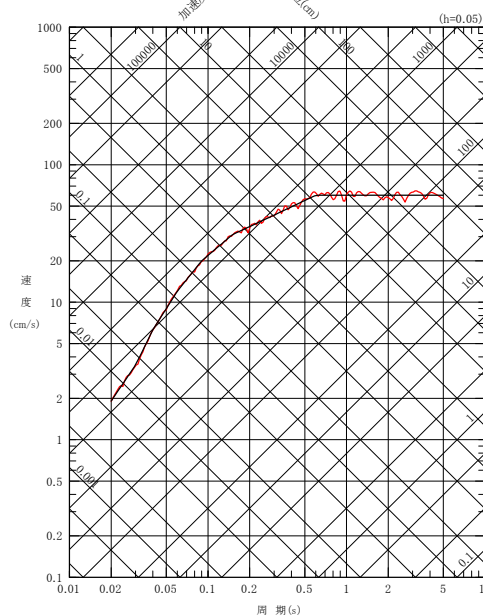
※: 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づく、解放基盤表面における地震動の評価結果は、巻末の(補足1)参照。

適合状況

| | 最大加速度 (cm/s ²) | 継続時間 (s) | SI比 | 最小応答 スペクトル比 |
|------|-------------------------------|-------------|------|----------------|
| NS成分 | 600.0 | 38.00 | 1.01 | 0.90 |
| EW成分 | 600.0 | 38.00 | 1.00 | 0.89 |



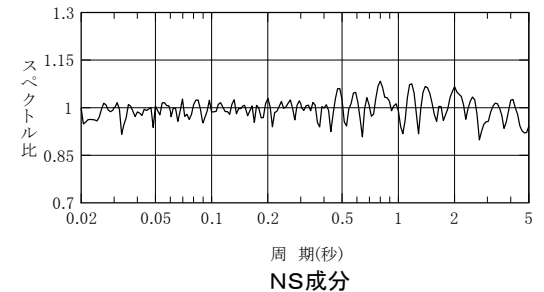
NS成分



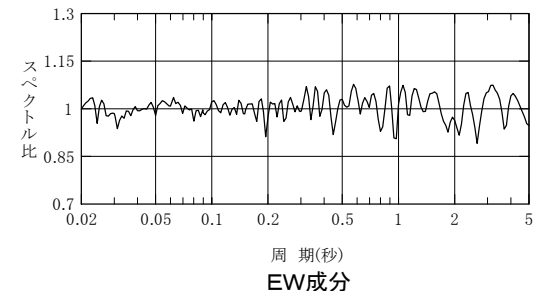
EW成分

応答スペクトル

実観測記録位相を用いる方法による模擬地震波の作成結果(水平方向)



NS成分



EW成分

スペクトル比

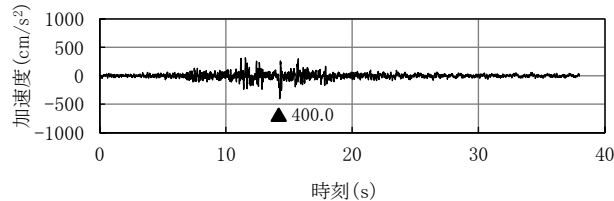
3.2.3 模擬地震波の作成 (7/7)



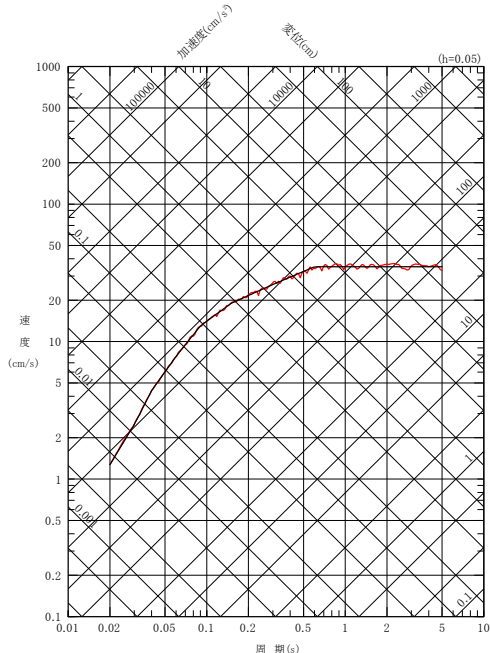
(3) 実観測記録位相を用いる方法 (4/4)

模擬地震波の作成結果 (2/2) (鉛直方向)

- 標準応答スペクトルを目標スペクトルとし、2004年9月8日の地震(M3.7)において敷地で得られた観測記録位相を用いて、模擬地震波を作成した。*
- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)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の比が全周期帯で0.85以上
 - 応答スペクトルの強度値の比(SI比)が1.0以上



加速度時刻歴波形(UD成分)
 — 模擬地震波の応答スペクトル
 — 標準応答スペクトル

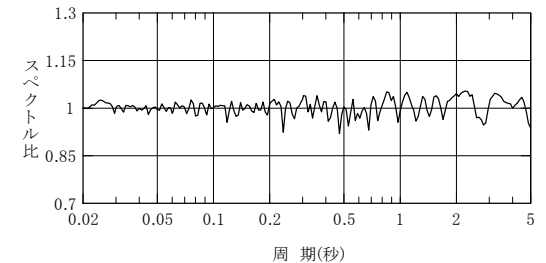


応答スペクトル(UD成分)

※: 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づく、解放基盤表面における地震動の評価結果は、巻末の(補足1)参照。

適合状況

| | 最大加速度 (cm/s ²) | 継続時間 (s) | SI比 | 最小応答 スペクトル比 |
|------|-------------------------------|-------------|------|----------------|
| UD成分 | 400.0 | 38.00 | 1.01 | 0.92 |



UD成分
 スペクトル比

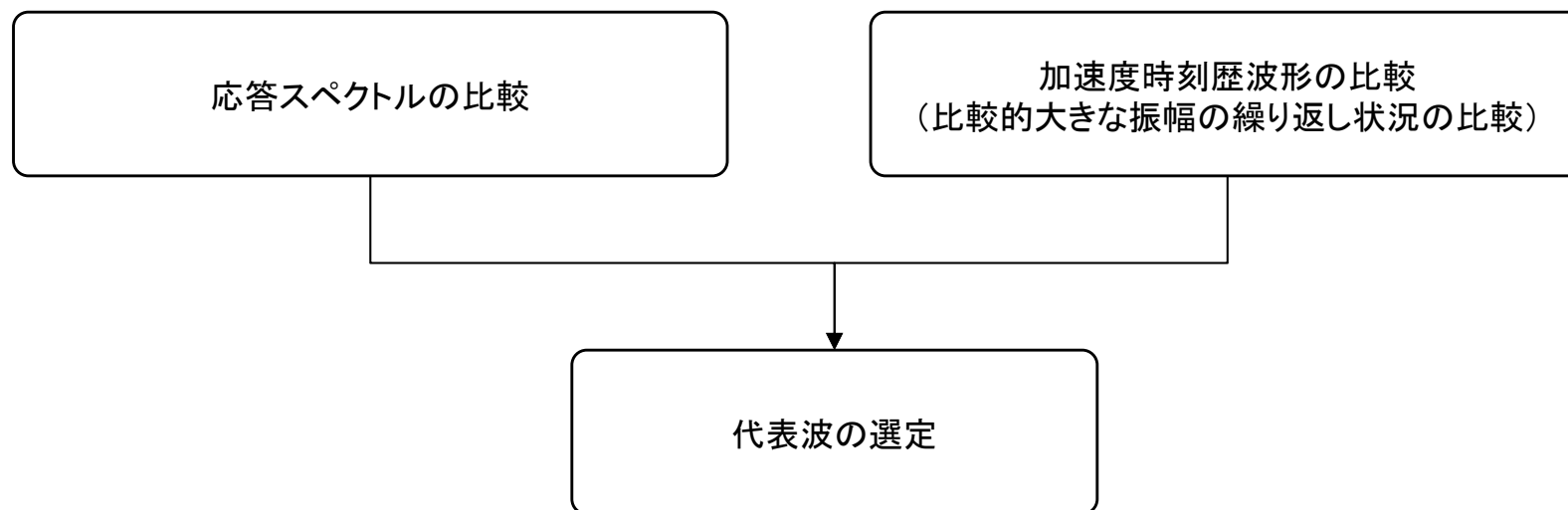
実観測記録位相を用いる方法による模擬地震波の作成結果(鉛直方向)

3.2.4 代表波の選定 (1/4)



(1) 代表波の選定方法

- 一様乱数位相を用いる方法により作成した模擬地震波と、実観測記録位相を用いる方法により作成した模擬地震波について、応答スペクトル及び加速度時刻歴波形の比較から、代表波を選定する。

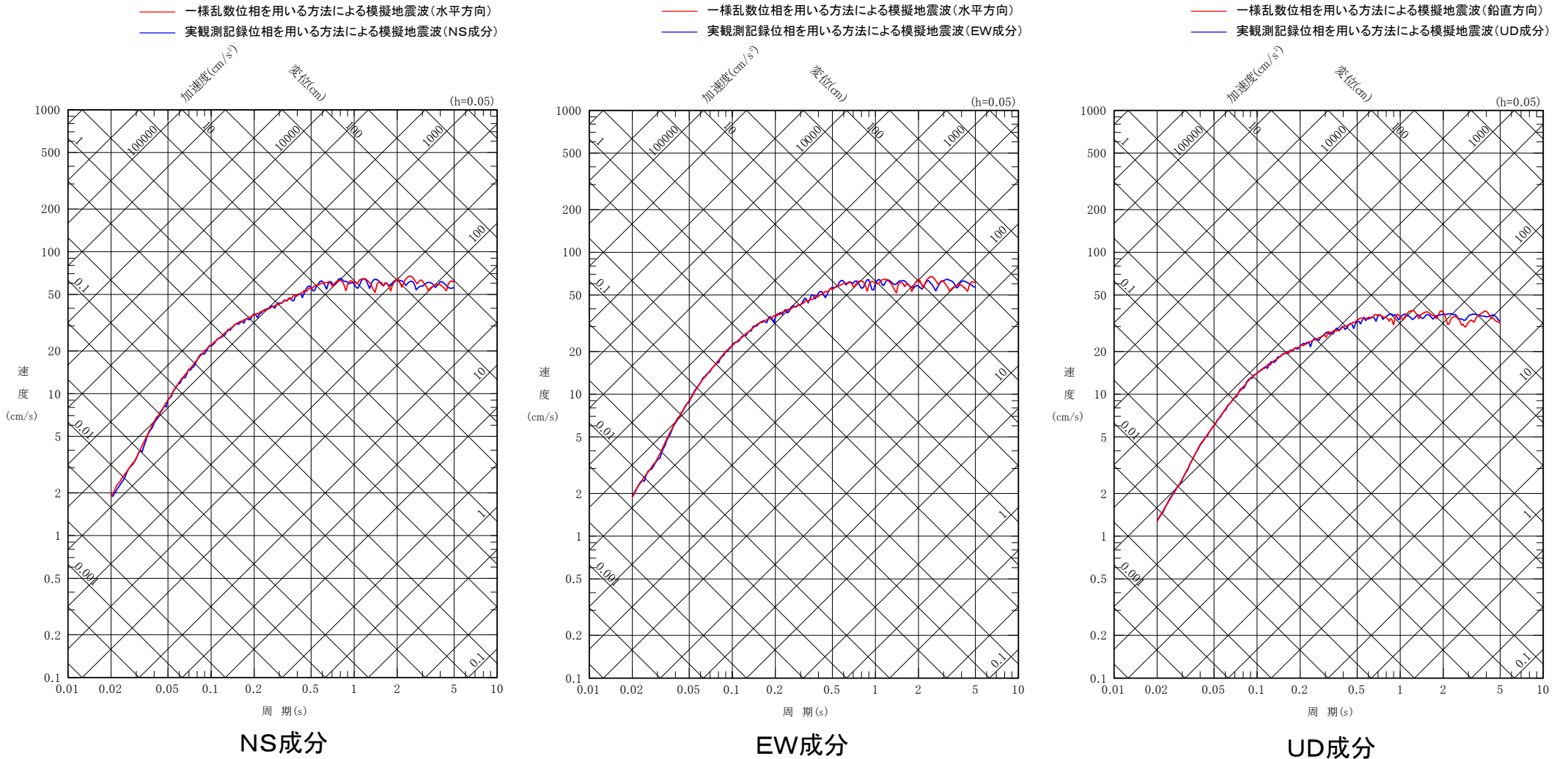


代表波の選定フロー

(2) 応答スペクトルの比較

• 一様乱數位相を用いる方法により作成した模擬地震波と実観測記録位相を用いる方法により作成した模擬地震波は、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、応答スペクトルに差異は見られない。*

※: 解放基盤表面における比較について、巻末の(補足1)参照。



作成した模擬地震波の位相の違いによる応答スペクトルの比較

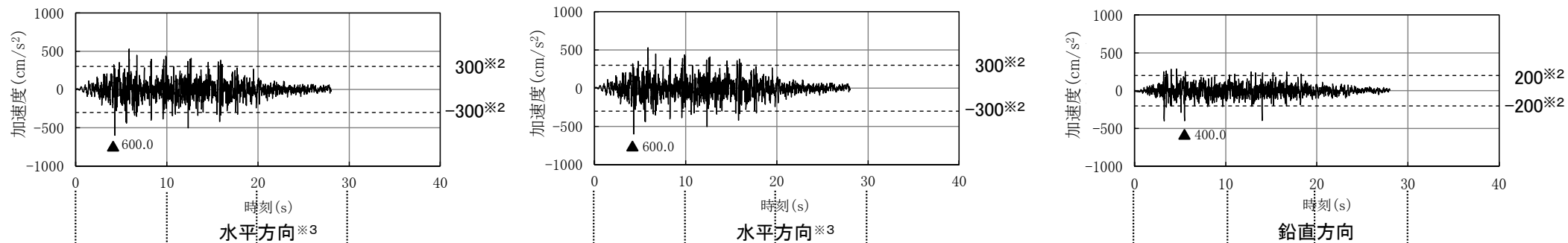
3.2.4 代表波の選定 (3/4)



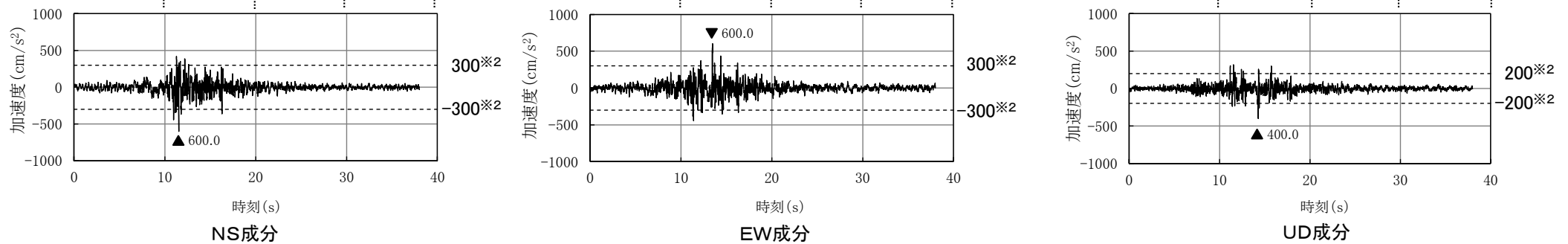
(3) 加速度時刻歴波形の比較

- 振幅の大きな主要動の継続時間を比較すると、一様乱数位相の方が、実観測記録位相よりも長くなっている。^{※1}
- 最大加速度値の50%以上の比較的大きな振幅に着目すると、一様乱数位相では10数秒程度の時間内で多くの繰り返しが生じているが、実観測記録位相では5秒間程度の時間内で複数生じているのみである。

※1: 参考として、地震動の全継続時間における総エネルギー入力のエネルギースペクトルを指標とした比較について、巻末の(参考1)参照。



一様乱数位相を用いる方法により作成した模擬地震波の加速度時刻歴波形



実観測記録位相を用いる方法により作成した模擬地震波の加速度時刻歴波形
(一様乱数位相とS波の立ち上がり付近の時刻を揃えて比較)

※2: 比較のため、最大加速度値の50%のレベルを破線で示す。

※3: 一様乱数位相を用いる方法の水平方向は、NS成分、EW成分ともに同じ波形を記載。

3.2.4 代表波の選定 (4/4)

(4) まとめ

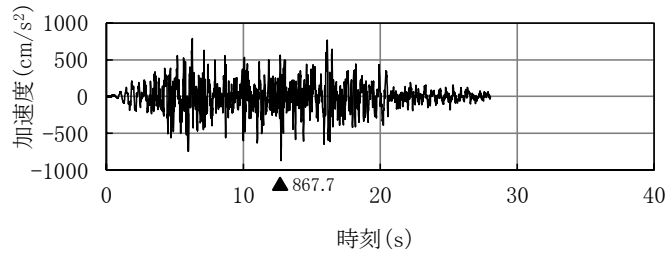
- 複数の方法を用いて作成した模擬地震波について、応答スペクトル及び加速度時刻歴波形を比較した。
- 応答スペクトルに差異は見られないものの、加速度時刻歴波形の比較的大きな振幅は、一様乱数位相の方がより長い時間内に、より多く繰り返し生じている。
- 以上を踏まえ、一様乱数位相を用いる方法により作成した模擬地震波を、代表波として選定する。

3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動

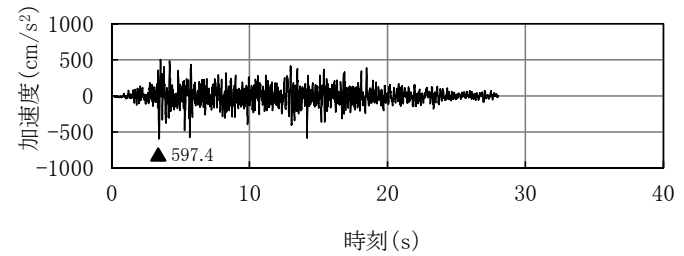


解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動

- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を、一様乱数位相を用いる方法により作成した模擬地震波を用いて評価した。
- 地震基盤相当面からの地盤増幅について、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき評価した地震動(水平方向867.7 cm/s², 鉛直方向597.4cm/s²)を、震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

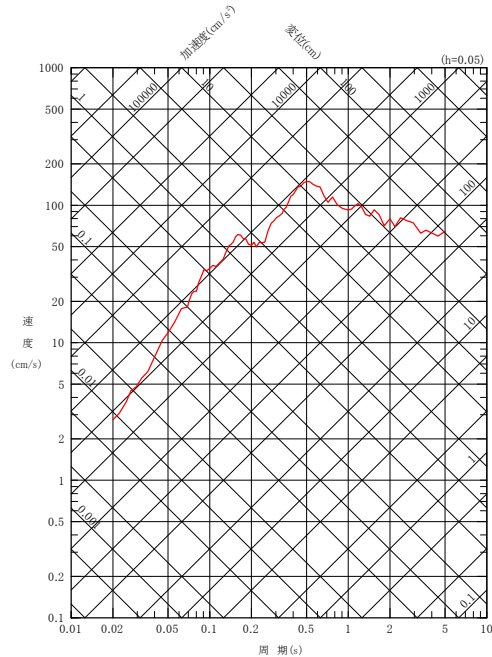


水平方向

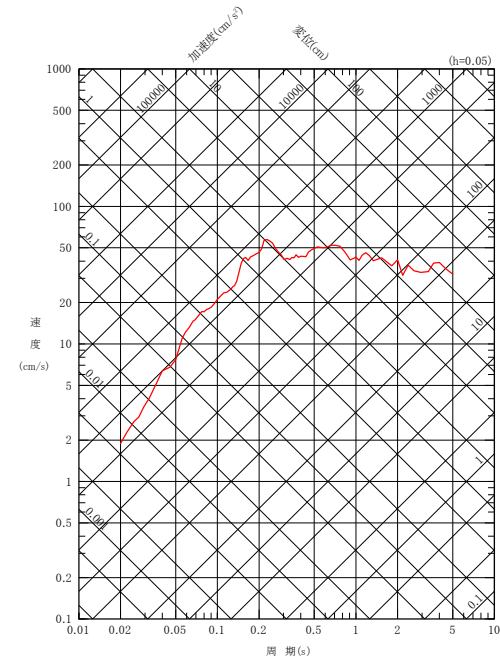


鉛直方向

加速度時刻歴波形



水平方向



鉛直方向

応答スペクトル

標準応答スペクトルを考慮した地震動

目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

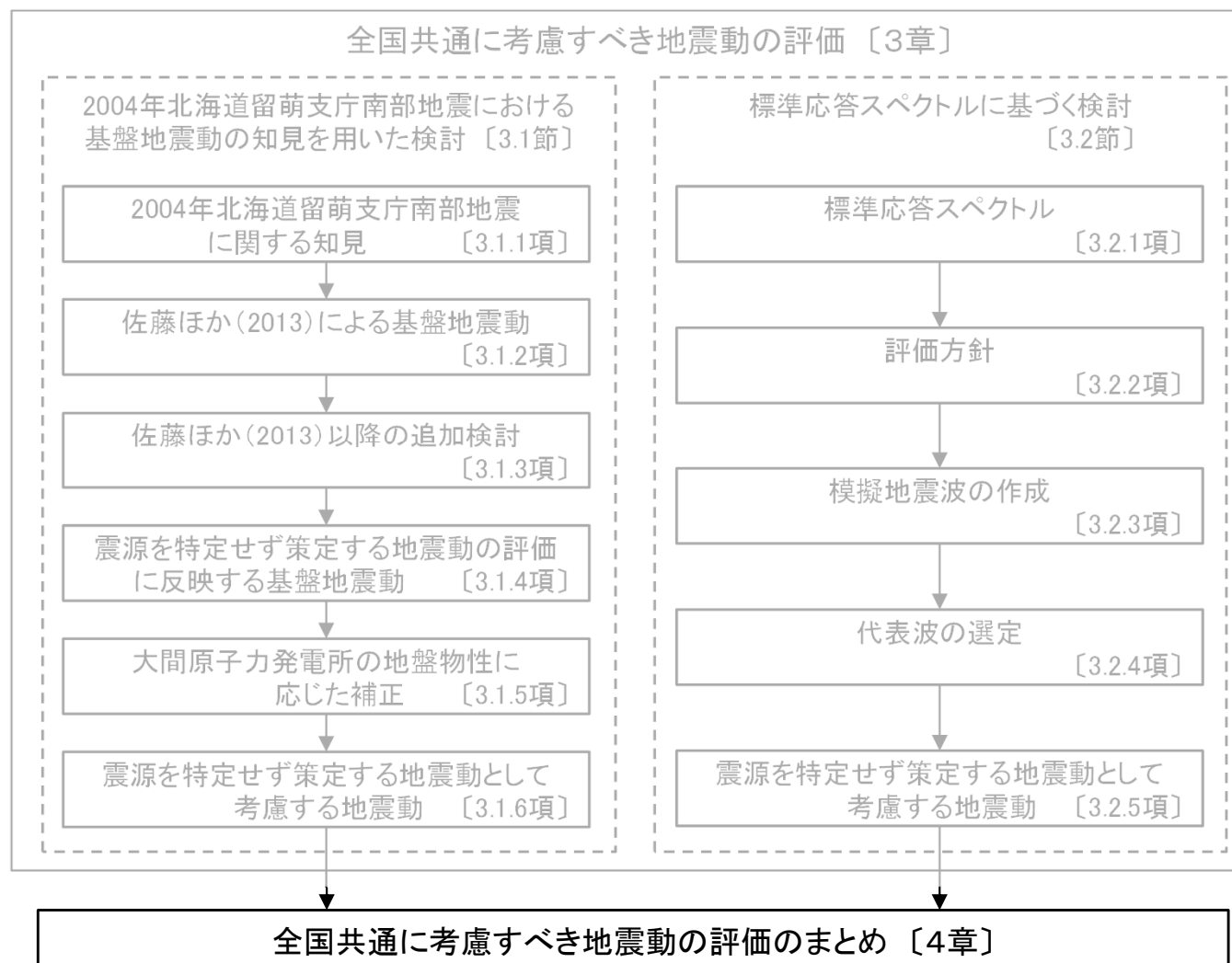
参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ（1/4）

本章の説明箇所

- 本章において、「全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ」について説明する。



4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ (2/4)

全国共通に考慮すべき地震動(1/3)

- 全国共通に考慮すべき地震動として、以下の地震動を考慮する。
 - 2004年北海道留萌支庁南部地震の基盤地震動について、佐藤ほか(2013)以降の追加調査結果を加えた検討等による再評価、及び更なる保守性を勘案した評価を行った上で、大間原子力発電所の地盤物性との違いを補正した地震動。
 - 「標準応答スペクトル」に基づき、一様乱数位相を用いる方法により模擬地震波を作成した上で、統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき評価した地震動。

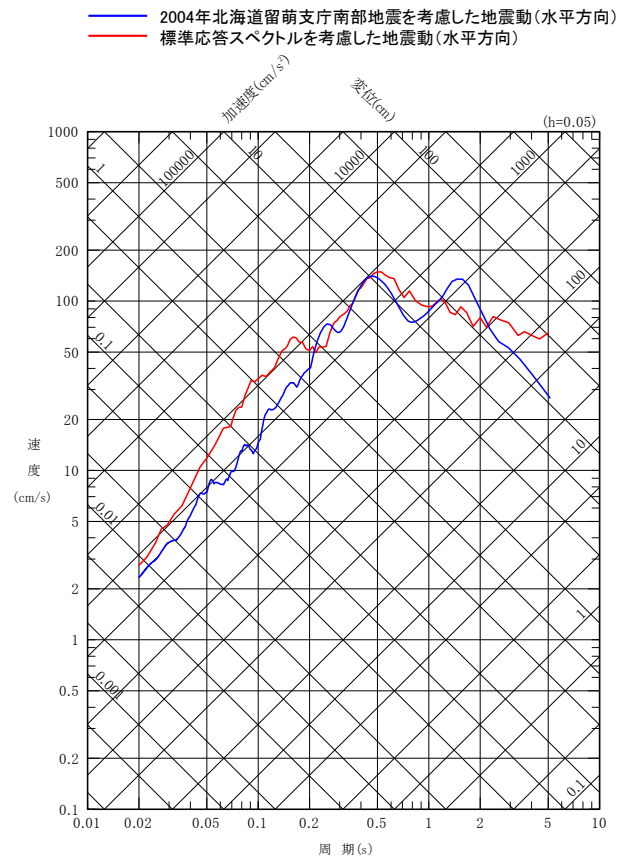
大間原子力発電所において震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動

| 地震動 | 最大加速度 (cm/s ²) | |
|--------------------------|----------------------------|-------|
| | 水平方向 | 鉛直方向 |
| 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動 | 734.1 | 376.0 |
| 標準応答スペクトルを考慮した地震動 | 867.7 | 597.4 |

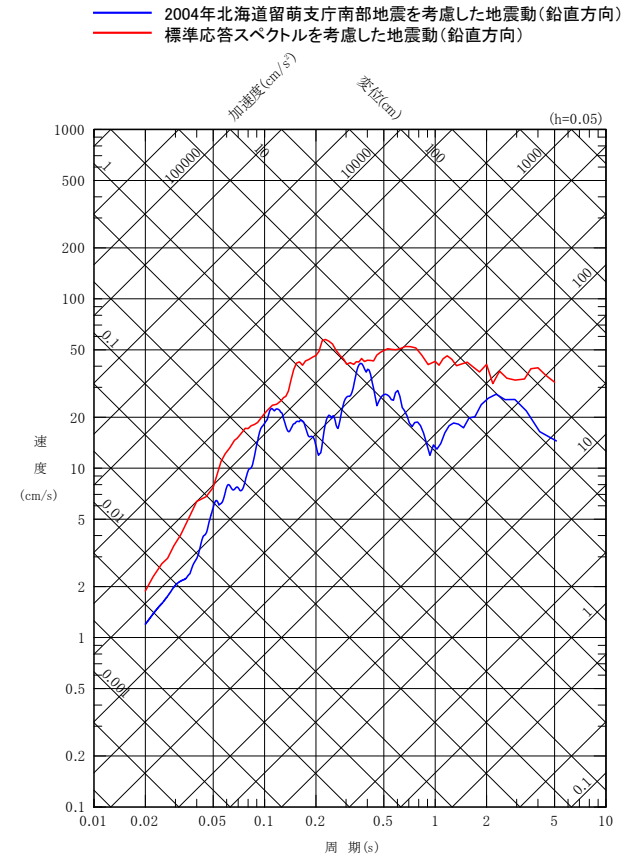
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ (3/4)

全国共通に考慮すべき地震動(2/3)

- 全国共通に考慮すべき地震動の応答スペクトルを示す。



水平方向



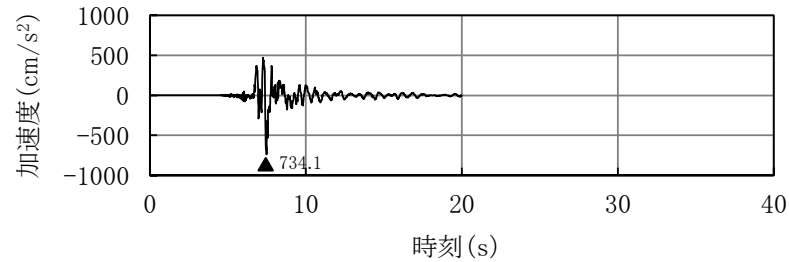
鉛直方向

全国共通に考慮すべき地震動の応答スペクトル

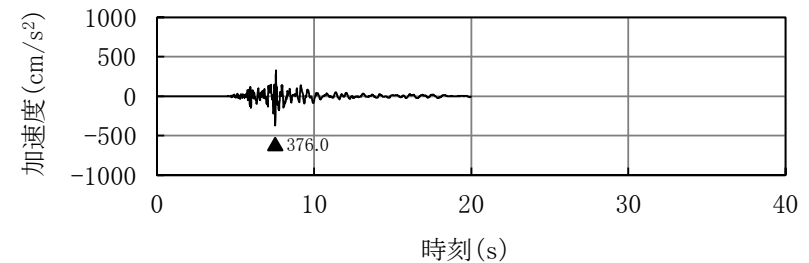
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ (4/4)

全国共通に考慮すべき地震動(3/3)

- 全国共通に考慮すべき地震動の加速度時刻歴波形を示す。

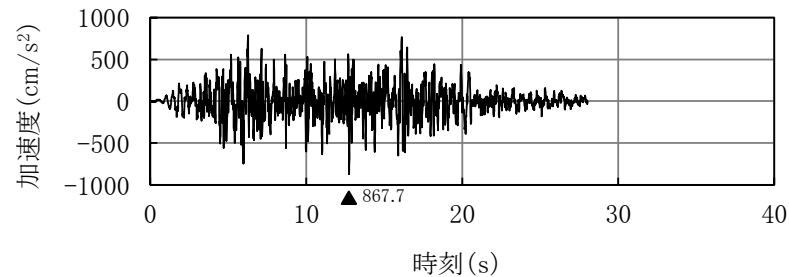


水平方向

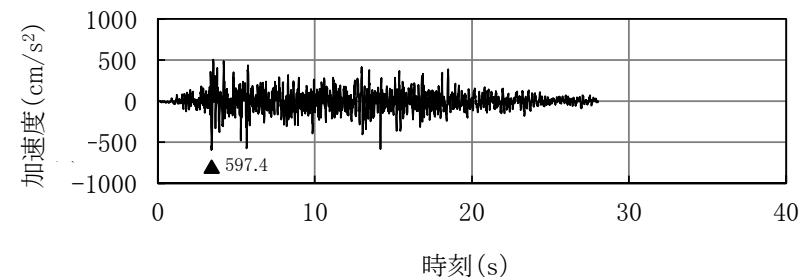


鉛直方向

2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動



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

全国共通に考慮すべき地震動の加速度時刻歴波形

目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

補足説明資料

(補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について

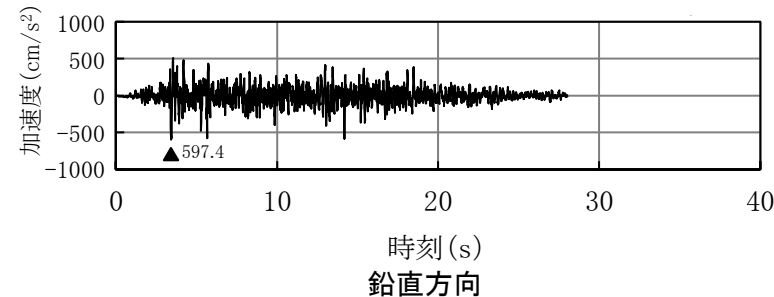
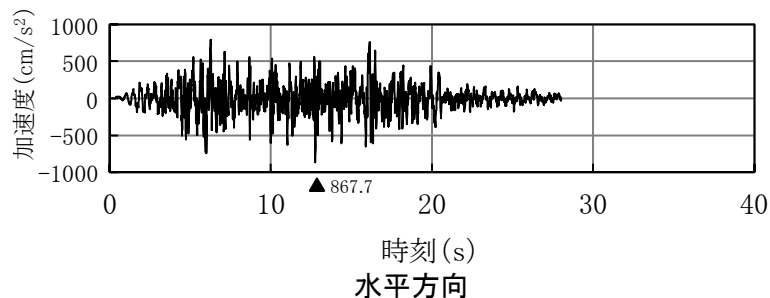
- 統計的グリーン関数法に用いる深部地下構造モデルに基づき評価した、解放基盤表面における地震動の説明。
- 解放基盤表面における、応答スペクトル及びエネルギースペクトルの比較。

(補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

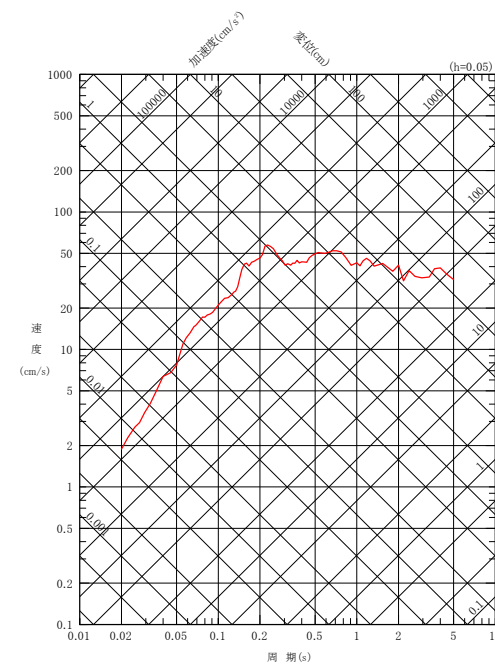
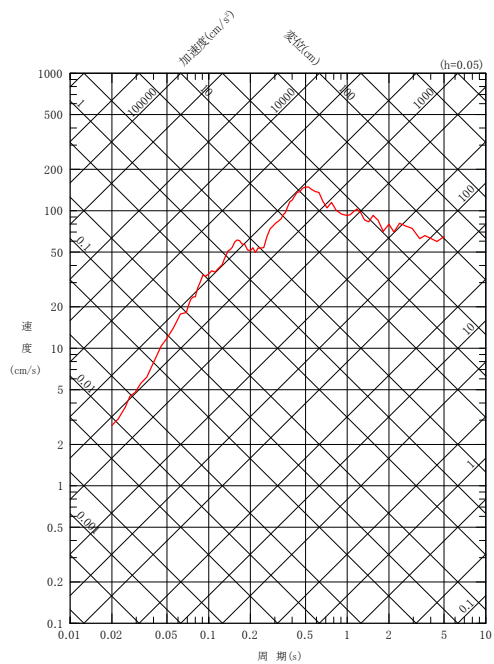
- 4章の検討のうち、「(3)実観測記録位相を用いる方法」に適用する観測記録の選定に関する詳細説明。

(1) 一様乱数位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動

- 一様乱数位相を用いる方法により作成した模擬地震波を用いて、解放基盤表面における地震動を評価した結果、水平方向の最大加速度は 867.7cm/s^2 、鉛直方向の最大加速度は 597.4cm/s^2 となった。



加速度時刻歴波形



水平方向

鉛直方向

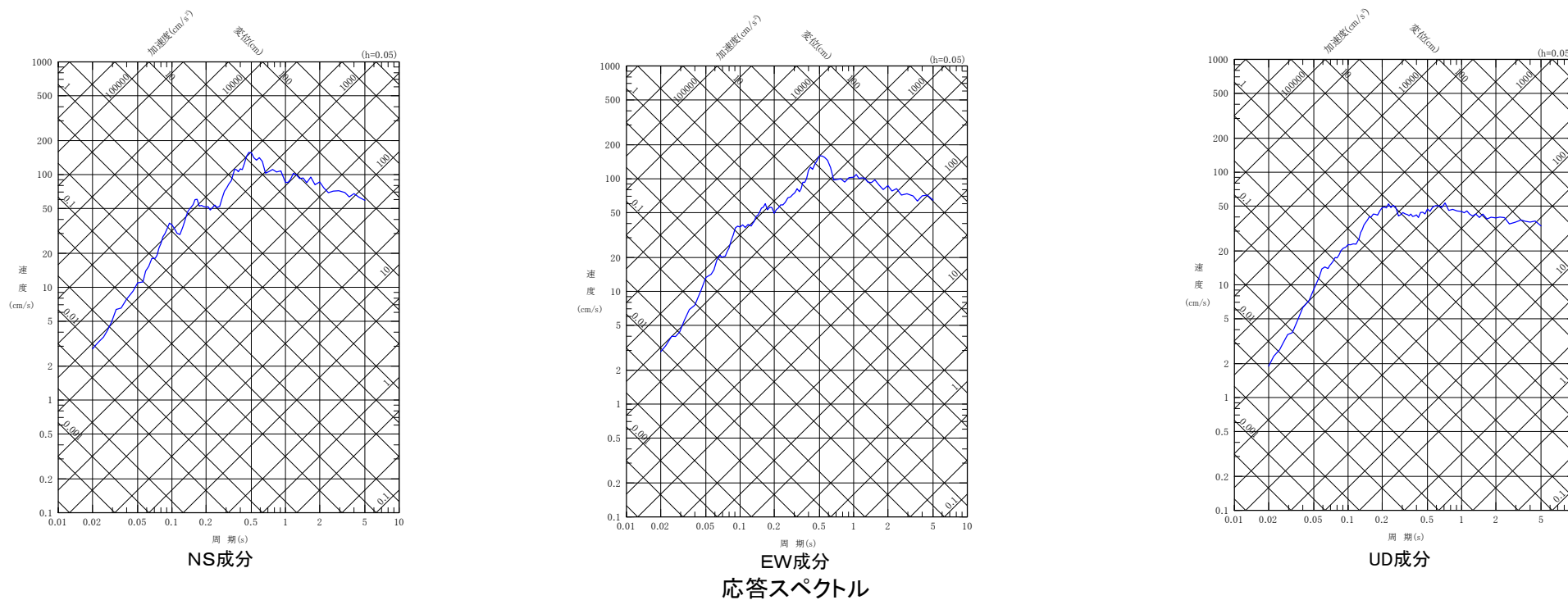
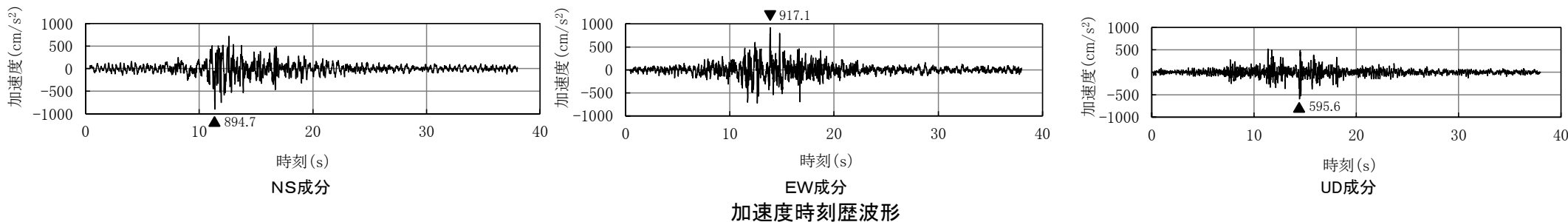
応答スペクトル

一様乱数位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動



(2) 実観測記録位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動

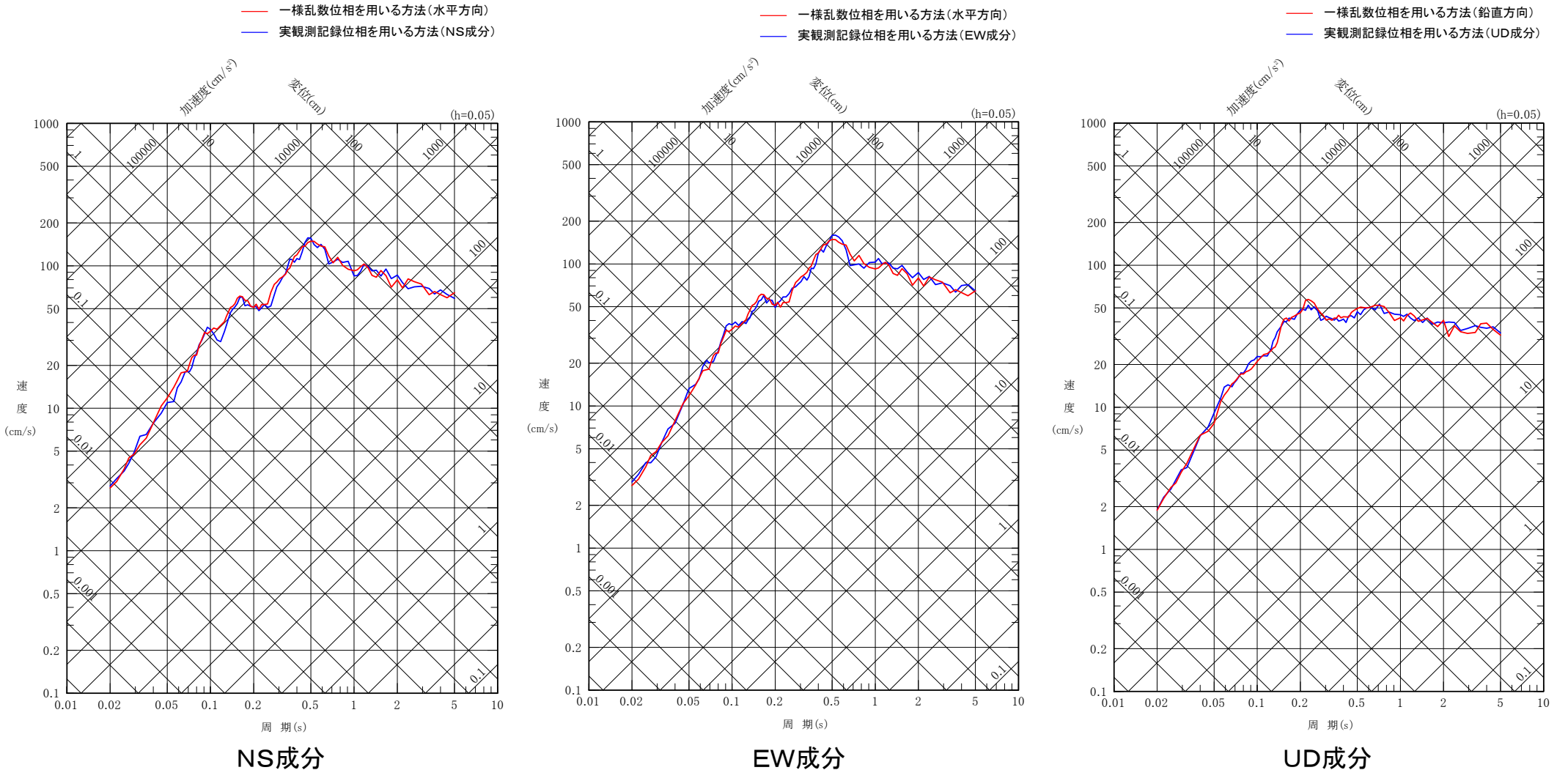
- 実観測記録位相を用いる方法により作成した模擬地震波を用いて、解放基盤表面における地震動を評価した結果、NS成分の最大加速度は894.7 cm/s^2 、EW成分の最大加速度は917.1 cm/s^2 、UD成分の最大加速度は595.6 cm/s^2 となった。



実観測記録位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動

(3) 解放基盤表面における位相の違いによる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る方法と実観測記録位相を用いる方法の地震動の応答スペクトルに差異は見られない。



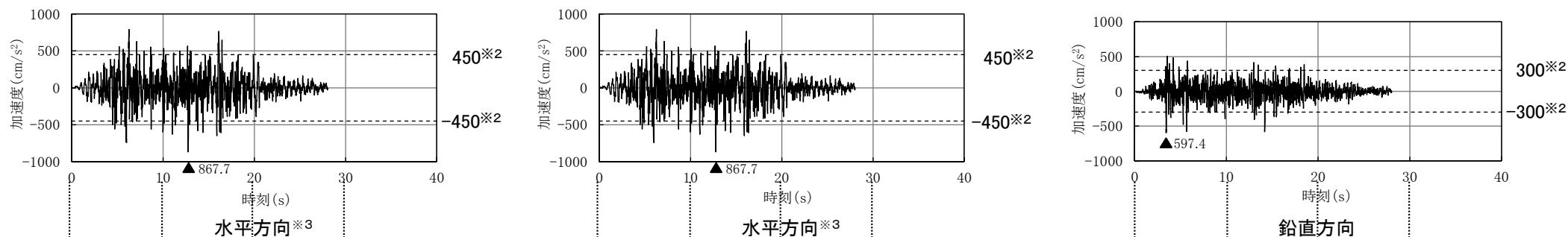
解放基盤表面における位相の違いによる応答スペクトルの比較



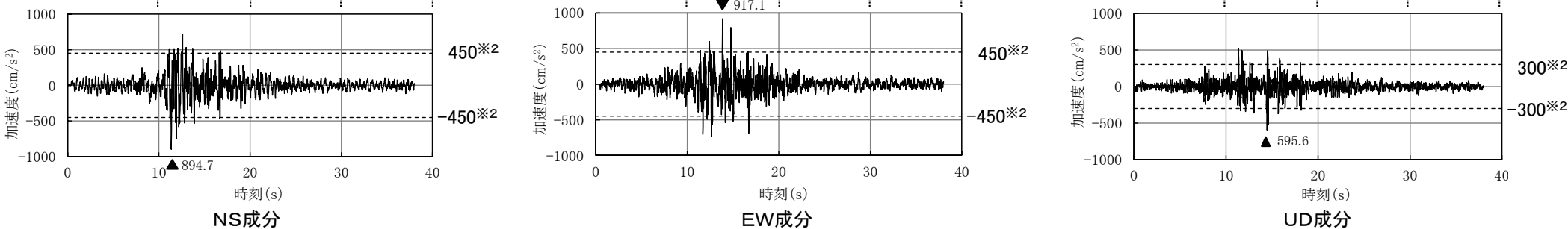
(3) 解放基盤表面における位相の違いによる加速度時刻歴波形の比較

- 振幅の大きな主要動の継続時間を比較すると、一様乱数位相の方が、実観測記録位相よりも長くなっている。^{※1}
- 最大加速度値の50%程度以上の比較的大きな振幅に着目すると、一様乱数位相では10数秒程度の時間内で多くの繰り返しが生じているが、実観測記録位相では5秒間程度の時間内で複数生じているのみであり、地震基盤相当面における模擬地震波と同様の傾向である。

※1: 参考として、地震動の全継続時間における総エネルギー入力のエネルギースペクトルを指標とした比較について、巻末の(参考1)参照。



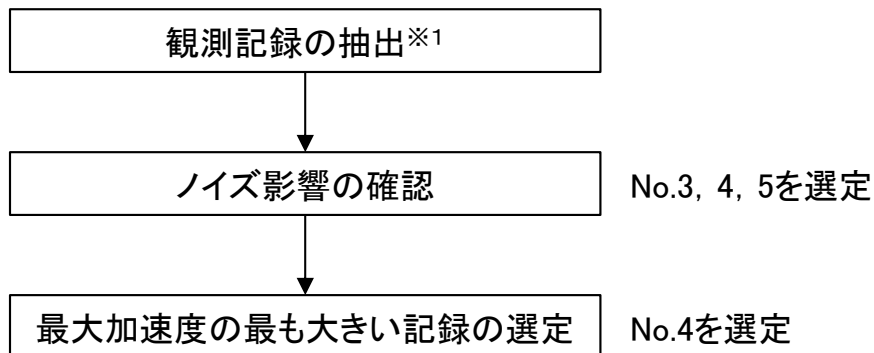
一様乱数位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動の加速度時刻歴波形



実観測記録位相を用いる方法による解放基盤表面における地震動の加速度時刻歴波形
(一様乱数位相とS波の立ち上がり付近の時刻を揃えて比較)

※2: 比較のため、最大加速度値の50%程度のレベルを破線で示す。
※3: 一様乱数位相を用いる方法の水平方向は、NS成分、EW成分とも同じ波形を記載。

- 抽出された地震観測記録に対して、ノイズ影響のない観測記録の中から最大加速度が最も大きい記録である、2004年9月8日の地震を選定した。



※1: 抽出条件

- 観測点 : サイト内鉛直アレイ観測点
- 観測期間 : 1989年8月～2019年12月
- 震央距離 : 30km以内
- 震源深さ : 0～20km
- メカニズム : 指定なし
- M : 4.0程度以上※2

※2: M4.0以上の地震は1地震のみのため、Mの範囲を拡張し、上位5地震を抽出した。

観測記録の選定フロー

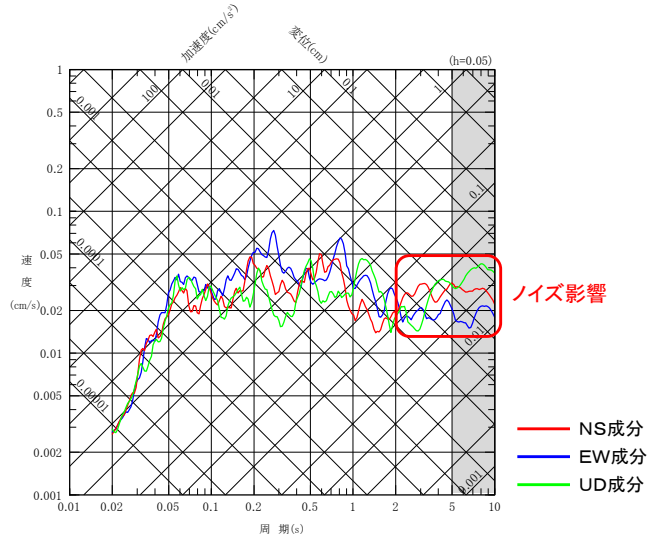
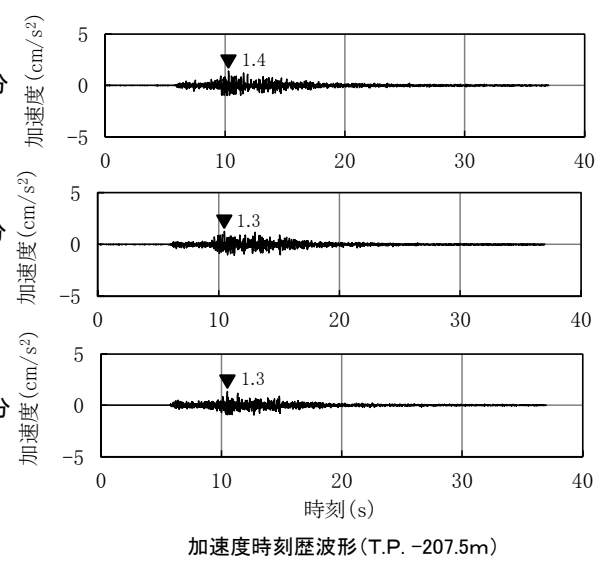
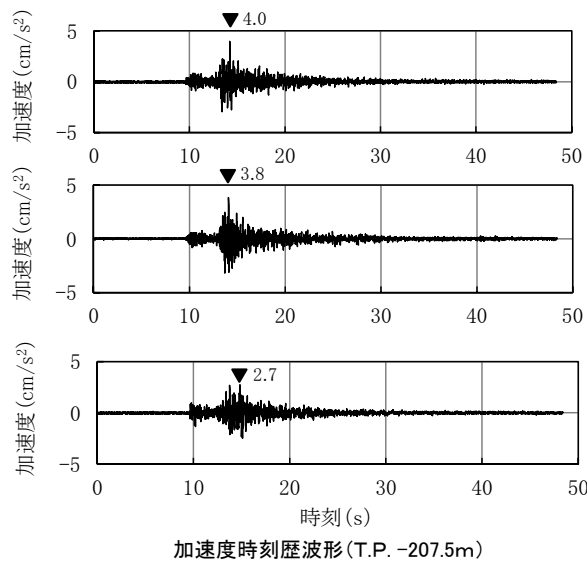
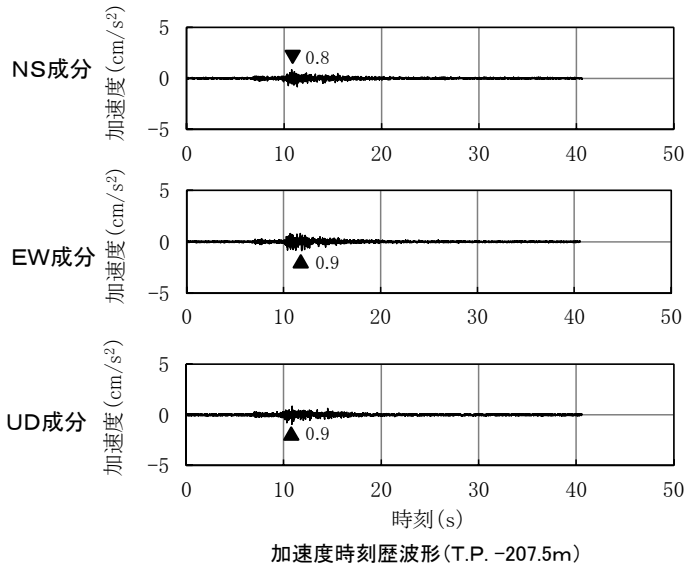
抽出された地震観測記録

| No. | 発生日時 | 震央位置 | | M | 震央距離 (km) | 震源深さ (km) | NS成分 最大値 (cm/s ²) | EW成分 最大値 (cm/s ²) | UD成分 最大値 (cm/s ²) | 選定 |
|-----|------------------|--------|---------|-----|--------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----|
| | | 北緯(°) | 東経(°) | | | | | | | |
| 1 | 1993.02.11 03:51 | 41.263 | 140.955 | 3.7 | 28 | 13 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | |
| 2 | 1998.10.18 01:08 | 41.266 | 140.910 | 4.1 | 27 | 12 | 4.0 | 3.8 | 2.7 | |
| 3 | 2004.09.04 11:18 | 41.262 | 140.816 | 3.8 | 29 | 14 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | |
| 4 | 2004.09.08 20:59 | 41.261 | 140.817 | 3.7 | 29 | 12 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | ○ |
| 5 | 2016.09.25 13:03 | 41.553 | 140.608 | 3.7 | 26 | 13 | 1.4 | 1.2 | 0.9 | |

(補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定(2/3)

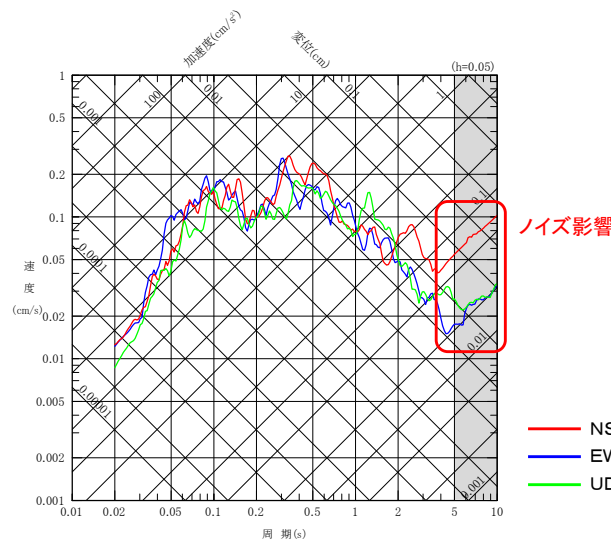


- No. 1, No. 2の観測記録は、長周期側でノイズ影響が見られる。
- No. 3の観測記録は、No. 4の観測記録と比較して最大加速度が小さい。



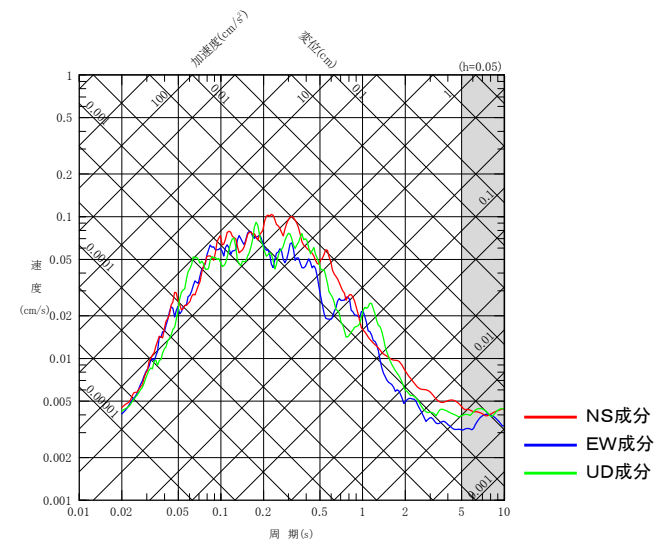
応答スペクトル (T.P. -207.5m) ※

No.1 1993/2/11 03:51 M3.7



応答スペクトル (T.P. -207.5m) ※

No.2 1998/10/18 01:08 M4.1

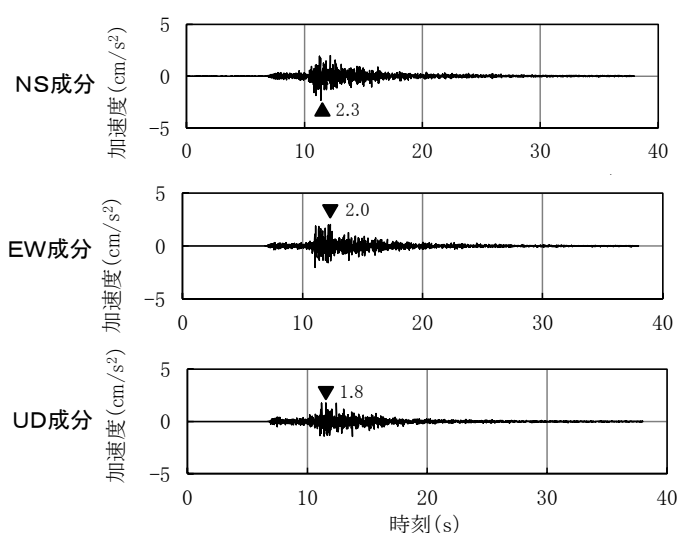


応答スペクトル (T.P. -207.5m) ※

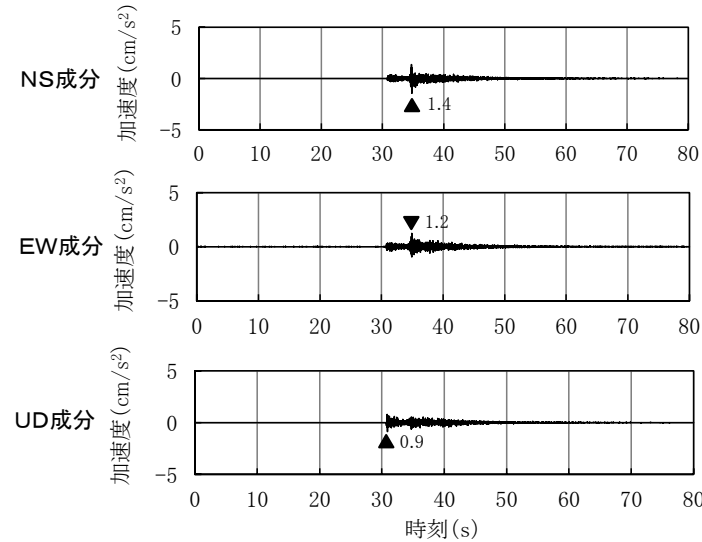
No.3 2004/9/4 11:18 M3.8

※: 応答スペクトルの周期5秒以上は、地震計の感度がやや低下するが、ノイズ影響を見やすくするために参考として示す。

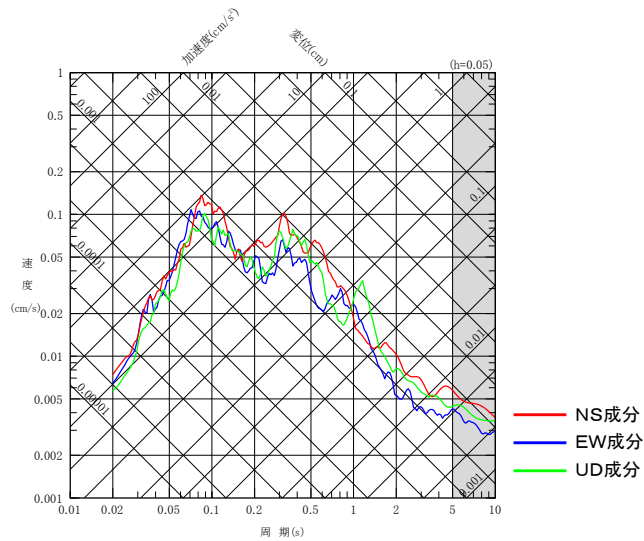
• No. 5の観測記録は, No. 4の観測記録と比較して最大加速度が小さい。



加速度時刻歴波形 (T.P. -207.5m)

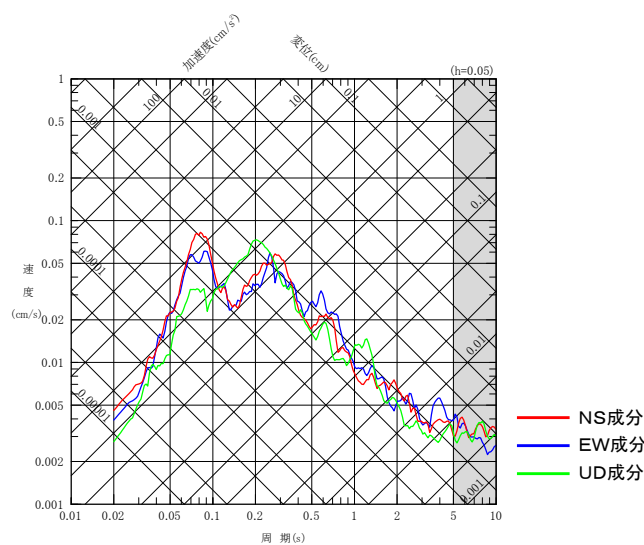


加速度時刻歴波形 (T.P. -207.5m)



応答スペクトル (T.P. -207.5m)※

No.4 2004/9/8 20:59 M3.7



応答スペクトル (T.P. -207.5m)※

No.5 2016/9/25 13:03 M3.7

※: 応答スペクトルの周期5秒以上は, 地震計の感度がやや低下するが, ノイズ影響を見やすくするために参考として示す。

目次

1. はじめに
 - 1.1 基準地震動策定の全体フロー
 - 1.2 申請後に得られた知見の反映や先行炉の審査を踏まえた主な変更点
2. 震源を特定せず策定する地震動の検討概要
 - 2.1 審査ガイド等の記載事項を踏まえた震源を特定せず策定する地震動の検討方針
 - 2.2 震源を特定せず策定する地震動の検討フロー
3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価
 - 3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討
 - 3.1.1 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する知見
 - 3.1.2 佐藤ほか(2013)による基盤地震動
 - 3.1.3 佐藤ほか(2013)以降の追加検討
 - 3.1.4 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
 - 3.1.5 大間原子力発電所の地盤物性に応じた補正
 - 3.1.6 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
 - 3.2 標準応答スペクトルに基づく検討
 - 3.2.1 標準応答スペクトル
 - 3.2.2 評価方針
 - 3.2.3 模擬地震波の作成
 - 3.2.4 代表波の選定
 - 3.2.5 震源を特定せず策定する地震動として考慮する地震動
4. 全国共通に考慮すべき地震動の評価のまとめ

補足説明資料

- (補足1) 模擬地震波による解放基盤表面における地震動について
- (補足2) 検討に用いる地震観測記録の選定

参考資料

- (参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較
- (参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ
- (参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

参考資料

(参考1) エネルギースペクトルを指標とした比較

- 一様乱数位相を用いる方法及び実観測記録位相を用いる方法による地震動の、全継続時間における総エネルギー入力について、エネルギースペクトルを指標とした比較を示す。

(参考2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価結果との重ね合わせ

- 「震源を特定せず策定する地震動」のうち「全国共通に考慮すべき地震動」の応答スペクトルと、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち「F-14断層による地震」及び「奥尻海盆北東縁断層～奥尻海盆東縁断層～西津軽海盆東縁断層の連動を考慮した地震」の地震動の応答スペクトルとの重ね合わせを示す。

(参考3) 2021年10月補正申請における標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動

- 2021年10月補正申請における、標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動 S_s-N の説明。

(1) 比較方法

- 地震動の全継続時間における総エネルギー入力について、エネルギースペクトルを指標とした比較を行う。

エネルギースペクトル：地震動の全継続時間における総エネルギー入力を等価速度 V_E に変換し、構造物の固有周期との関係を表現。

運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = -M\ddot{x}_0$$



運動方程式の両辺に $\dot{x}dt (=dx)$ を乗じて、
全継続時間 t_n で時間積分

M: 質点の質量
x: 質点の相対変位
C: 減衰係数
k: 質点系の復元力
 \ddot{x}_0 : 地動の加速度

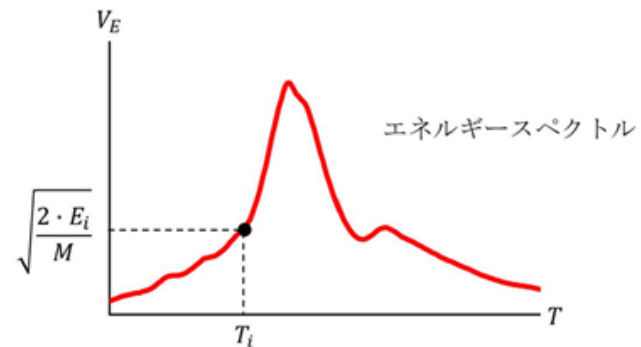
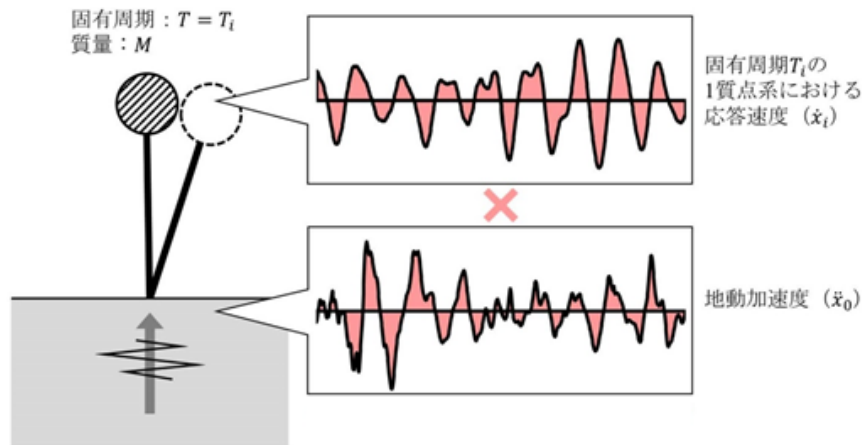
エネルギー方程式

$$\int_0^{t_n} M\ddot{x}\dot{x} dt + \int_0^{t_n} C\dot{x}^2 dt + \int_0^{t_n} kx\dot{x} dt = - \int_0^{t_n} M\ddot{x}_0\dot{x} dt$$

弾性振動エネルギー 減衰により消費されたエネルギー 累積塑性歪みエネルギー 総エネルギー入力

総エネルギー入力

$$E = - \int_0^{t_n} M\ddot{x}_0\dot{x} dt = \frac{1}{2} M V_E^2$$

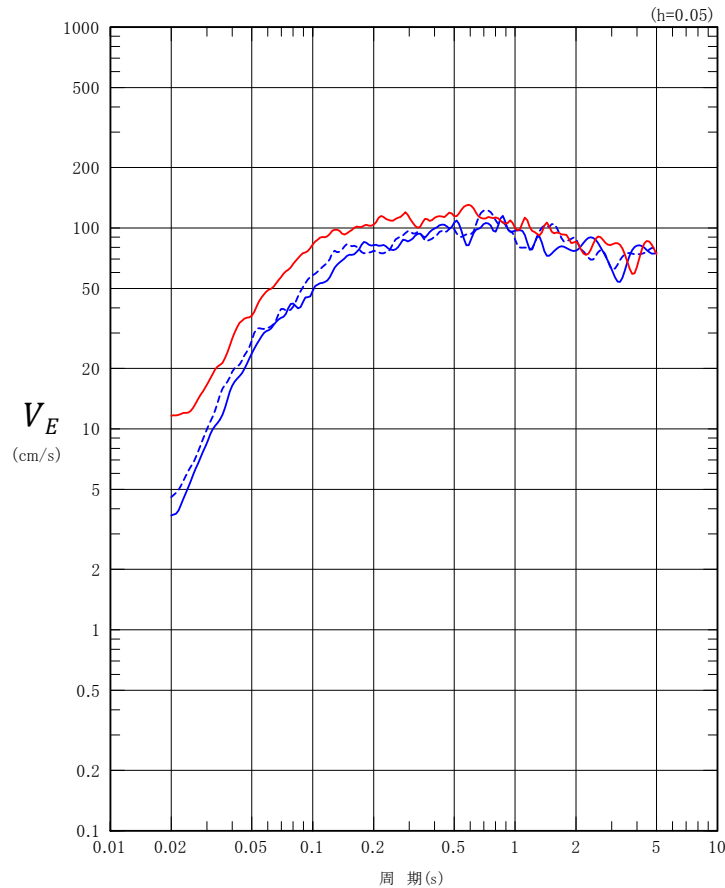


(2) 模擬地震波のエネルギースペクトルの比較

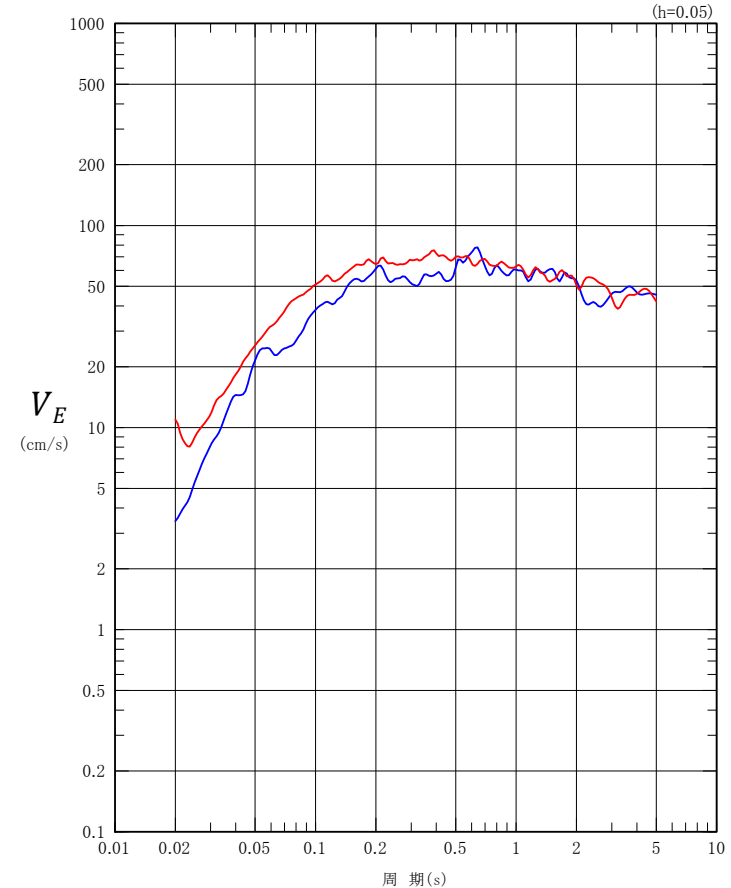
- 作成した模擬地震波のエネルギースペクトルは、一様乱数位相を用いる方法の方が、実観測記録位相を用いる方法より大きい傾向が見られる。

— 一様乱数位相を用いる方法による模擬地震波(水平方向)
— 実観測記録位相を用いる方法による模擬地震波(NS成分)
- - - 実観測記録位相を用いる方法による模擬地震波(EW成分)

— 一様乱数位相を用いる方法による模擬地震波(鉛直方向)
— 実観測記録位相を用いる方法による模擬地震波(UD成分)



水平方向

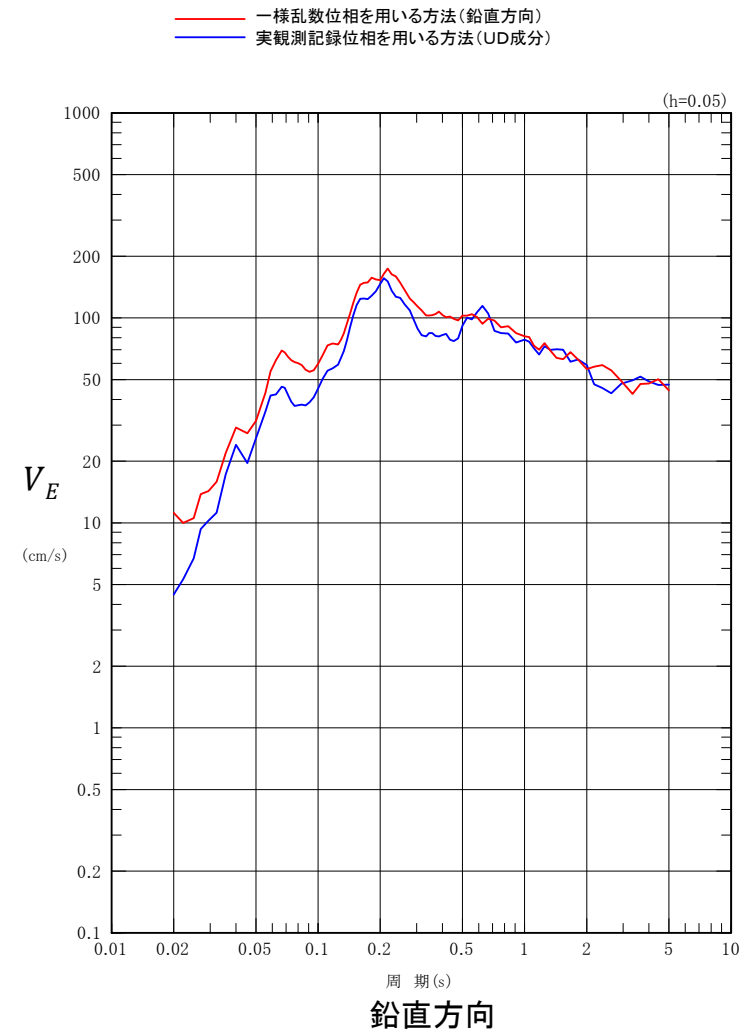
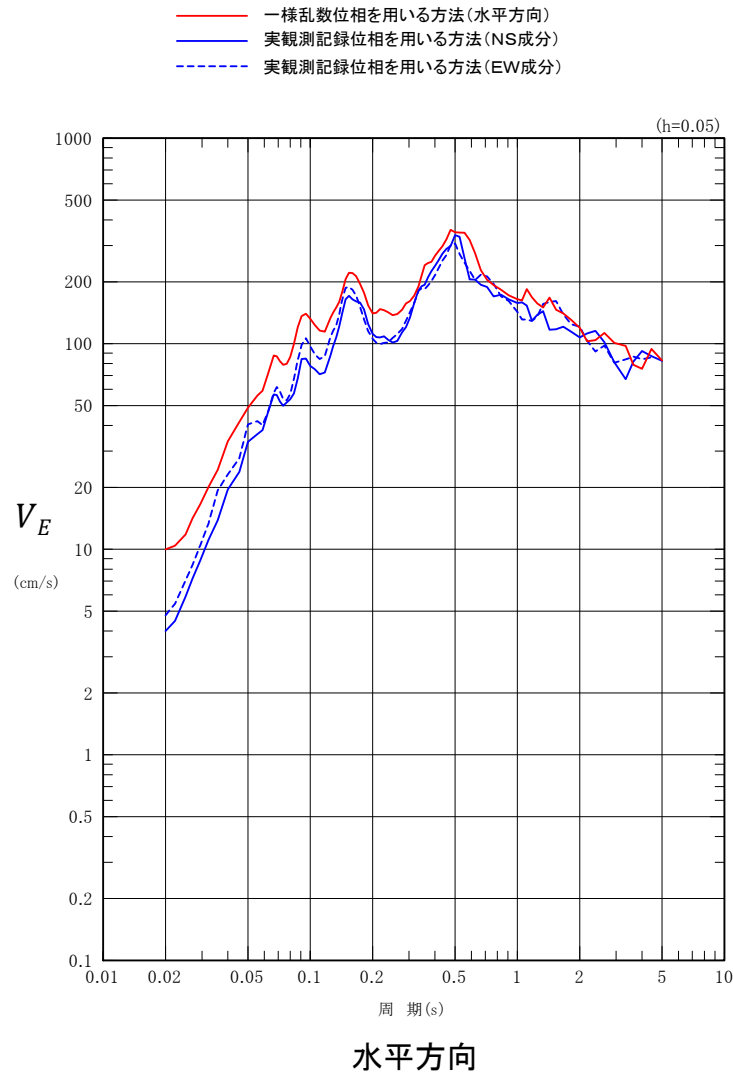


鉛直方向

作成した模擬地震波の位相の違いによるエネルギースペクトルの比較

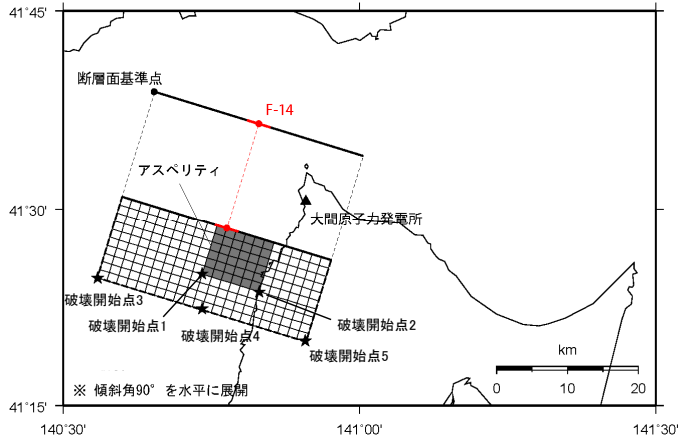
(4) 解放基盤表面におけるエネルギースペクトルの比較

• 解放基盤表面におけるエネルギースペクトルは、一様乱數位相を用いる方法の方が、実観測記録位相を用いる方法より大きい傾向が見られる。

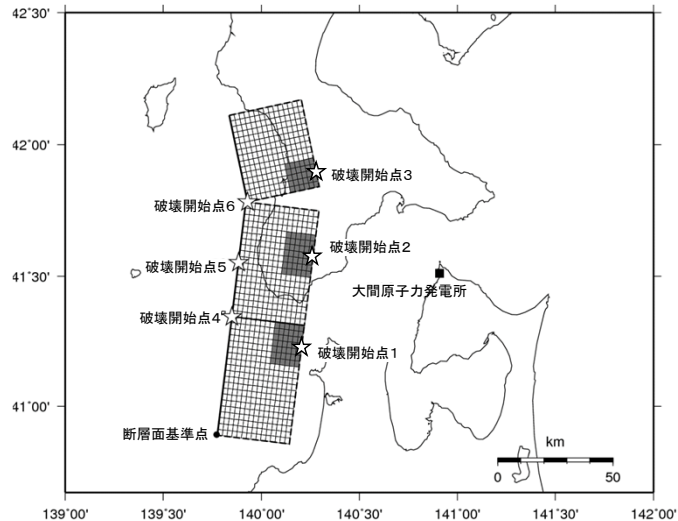


解放基盤表面における位相の違いによるエネルギースペクトルの比較

・「震源を特定せず策定する地震動」のうち「全国共通に考慮すべき地震動」の応答スペクトルと、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」のうち「F-14断層による地震」及び「奥尻海盆北東縁断層～奥尻海盆東縁断層～西津軽海盆東縁断層の連動を考慮した地震」の地震動の応答スペクトルとの重ね合わせを示す。

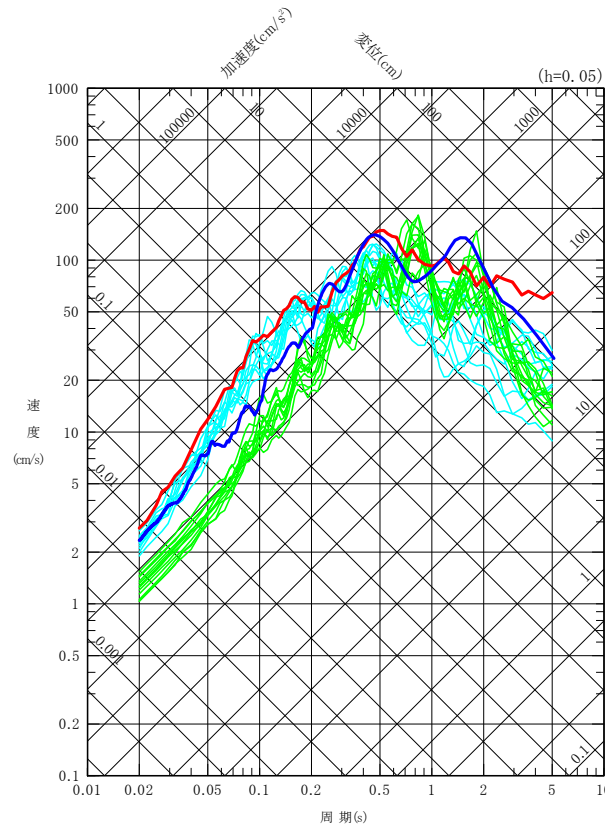


F-14断層による地震の震源モデルの地表面投影図
(短周期レベルの不確かさケース)

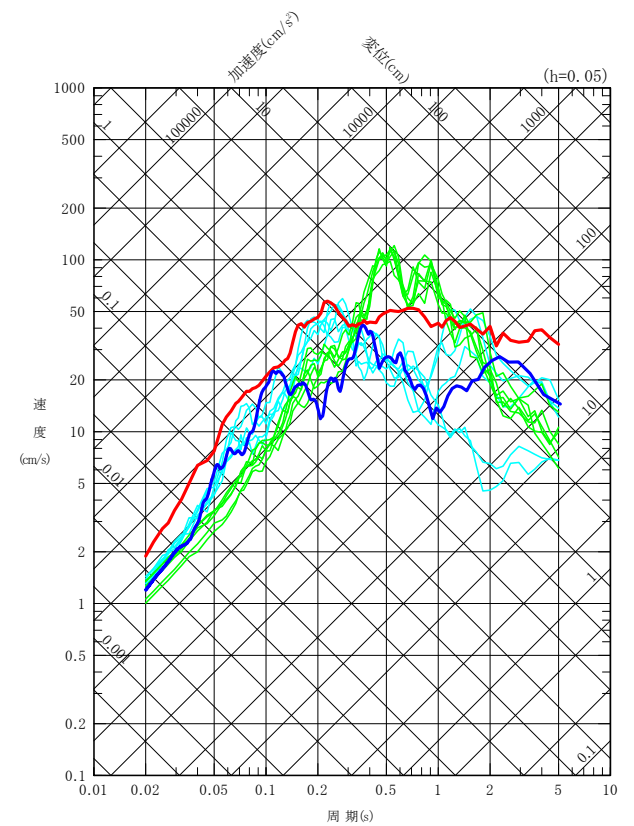


奥尻海盆北東縁断層～奥尻海盆東縁断層～西津軽海盆東縁断層の連動を考慮した地震の震源モデルの地表面投影図
(断層傾斜角の不確かさケース)

— 標準応答スペクトルを考慮した地震動
 — 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動
 — F-14断層による地震の地震動(短周期レベルの不確かさケース)
 — 奥尻海盆北東縁断層～奥尻海盆東縁断層～西津軽海盆東縁断層の連動を考慮した地震の地震動(断層傾斜角の不確かさケース)



水平方向



鉛直方向

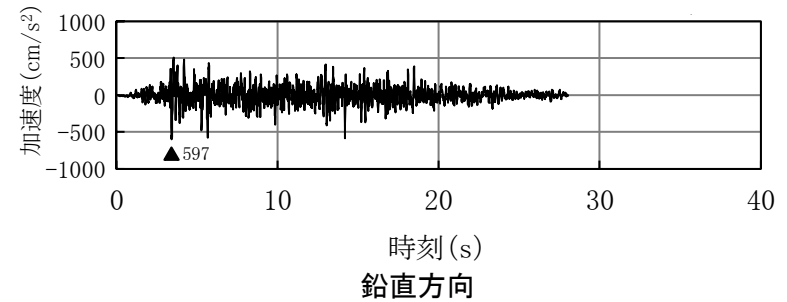
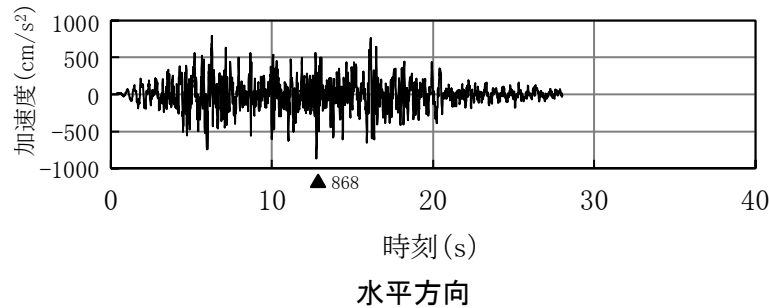
地震動の応答スペクトルの比較



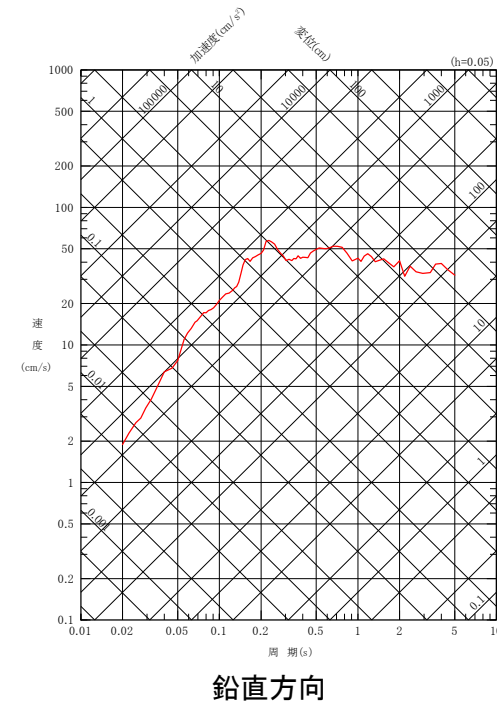
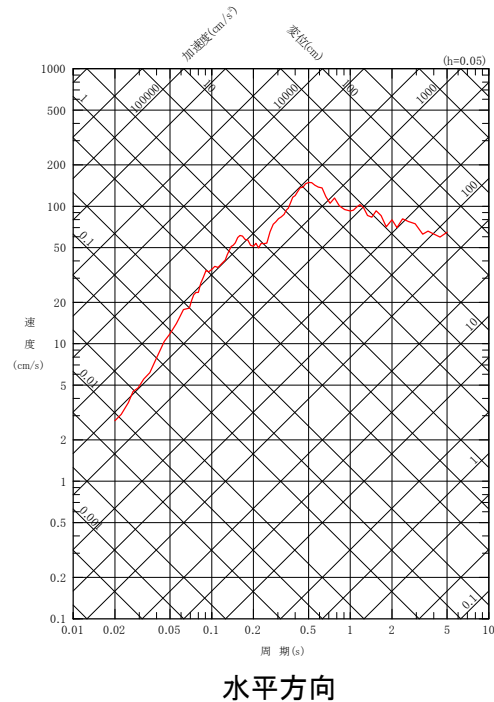
基準地震動S_s-N

- 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-N(水平方向の最大加速度868cm/s²※, 鉛直方向の最大加速度597cm/s²※)とした。

※: 基準地震動の最大加速度値の表記は, 設置変更許可申請書(2014年12月)における基準地震動の表記に合わせて, 小数第1位を四捨五入した整数とした。



加速度時刻歴波形



応答スペクトル

基準地震動S_s-N(標準応答スペクトルを考慮した地震動)

参考文献

1. はじめに

- 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, 2004
- 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, N13007, 2013

3. 全国共通に考慮すべき地震動の評価



3.1 2004年北海道留萌支庁南部地震における基盤地震動の知見を用いた検討

- 気象庁(2004): 平成16年12月 地震・火山月報(防災編)
- 気象庁: 震度データベース <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>
- 狐崎長琅・後藤典俊・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, 自然災害科学, 9-3, 1-17, 1990
- 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, 2008
- 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 第523号, 63-70, 1999

3.2 標準応答スペクトルに基づく検討

- 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
- 気象庁: 地震月報(カタログ編)
- 独立行政法人 原子力安全基盤機構(2004): 地震記録データベースSANDELのデータ整備と地震発生上下限層深さの評価に関する報告書(平成15年度), JNES/SAE04-017
- 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2015.