

泊発電所3号炉 標準応答スペクトルを考慮した 地震動評価について

令和4年5月13日
北海道電力株式会社

令和4年1月14日審査会合における指摘事項

○令和4年1月14日審査会合における指摘事項および指摘事項に対する回答方針を以下に示す。

No.	指摘事項	回答方針	ページ
1	標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、既往の地下構造モデルとは異なるモデルを用いることの妥当性が示されていない。 また、新たな地下構造モデルを設定するにあたり、減衰定数を大きく見直すことの妥当性が示されていない。	○標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、現状の観測記録等の限られたデータでは、地下構造モデルを見直すことの妥当性を示すことが難しいことから、既往の地下構造モデルを用いて評価を実施した。	8～9
2	乱数位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定において、主要動の継続時間を適切に設定するため、Noda et al. (2002) の手法に用いる地震規模について少なくともM7.0以上とすること。	○乱数位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定において、Noda et al. (2002) の手法に用いる地震規模をM7.0として、適切な模擬地震波を作成した。	12～14
3	観測位相を用いた模擬地震波の検討において、敷地で得られた観測記録だけでなく、敷地周辺の観測記録を整理し、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に反映する必要性について検討すること。	○敷地周辺の観測点における観測記録を収集した結果、特異な形状の波形はないことを確認した。また、乱数位相と観測位相を用いた模擬地震波の解放基盤表面における応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を比較した結果も踏まえ、乱数位相を用いた模擬地震波を標準応答スペクトルを考慮した地震動として採用した。	16～42

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動について	4
2. 地下構造モデルの設定	6
3. 模擬地震波の作成	10
4. 参考資料	46

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動について

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動について

再掲 (R4.1.14審査会合資料)

標準応答スペクトルを考慮した地震動

- 2021年4月21日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、泊発電所における標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価は、以下の通り、①地下構造モデルの設定、②地震基盤相当面における模擬地震波の作成、③解放基盤表面における地震動の設定、の流れで検討を実施する。

① 地下構造モデルの設定

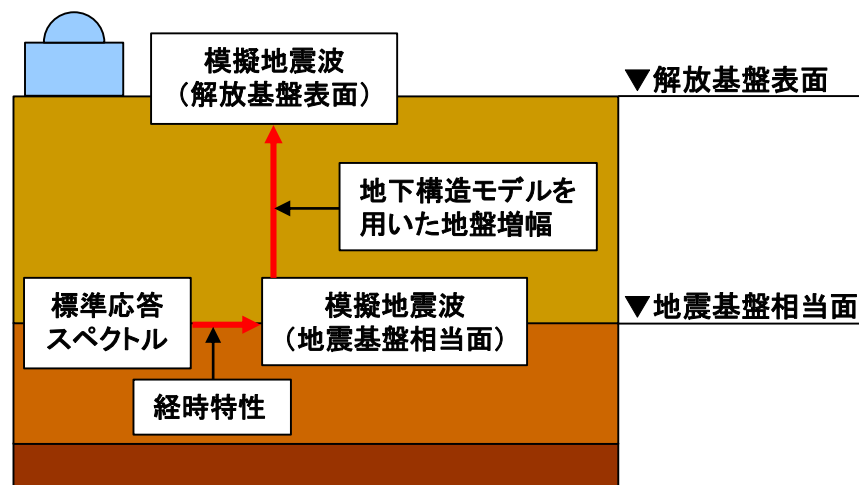


② 地震基盤相当面における模擬地震波の作成



③ 解放基盤表面における地震動の設定

標準応答スペクトルを考慮した地震動の
評価の流れ



標準応答スペクトルを考慮した地震動の
評価のイメージ

2. 地下構造モデルの設定

2. 地下構造モデルの設定

一部加筆修正 (R4.1.14審査会合資料)

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価に用いた地下構造モデルの設定方法

- 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では、解放基盤表面までの地震波の伝播特性を応答スペクトルの設定に反映することが求められている。
- 地震基盤から解放基盤表面までの地下構造モデルとしては、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の断層モデルを用いた手法による地震動評価において用いている地下構造モデル(2021年10月22日審査会合、以下、既往の地下構造モデルという。)があり、以下の通り設定されている。(参考資料4.1参照)

・敷地内・敷地周辺の調査結果・地震観測記録を活用して設定

・調査結果等がない場合、他機関の地下構造モデル等に基づき設定

- ① 標高 0m～ -250m : 地震観測点におけるボーリング調査・地震観測記録による同定解析
- ② 標高 -250m～ -990m : 1号機原子炉建屋位置におけるボーリング調査
- ③ 標高 -990m～ -2000m : 弾性波探査・文献
- ④ 標高 -2000m～ : 他機関の地下構造モデル

標高 (m)	層厚 (m)		密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0～ -56	56	地震観測点 PS 検層結果	地震観測点 ボーリングデータ	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)		地震観測記録による 同定解析結果を基に 安全側に設定
-56～ -250	194					
-250～ -430	180	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	1号機原子炉建屋 ボーリングデータ	1号機原子炉建屋 PS 検層結果		標高-250m 以浅 の設定値を用いる
-430～ -990	560					
-990～ -2000	1010	弾性波 探査結果	$\rho = 0.31Vp^{1/4}$ 物理探査 ハンドブック (1999)	Vp と Vs の関係式 により設定 太田ほか(1985)	弾性波 探査結果	
-2000 ～	—	—	防災科学技術研究所(2005)			

地下構造モデルの検討方針

○既往の地下構造モデルにおける減衰定数は、大きな裕度を持って設定されていると考えられる(参考資料4.2参照)ものの、現状の観測記録等の限られたデータでは、地下構造モデルを見直すことの妥当性を示すことが難しいことから、安全側の評価となる既往の地下構造モデルを用いて標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値	
0~-56	56	2.1	1175	2660	100	◁ 解放基盤表面
-56~-250	194	2.2	1935	3230	100	
-250~-430	180	1.9	1350	2700	100	
-430~-990	560	1.9	1560	3100	100	
-990~-2000	1010	2.5	2400	4500	100	
-2000~	—	2.8	3500	6400	150	◁ 地震基盤

既往の地下構造モデル

2. 地下構造モデルの設定

地下構造モデルの設定

- 既往の地下構造モデルは、地震基盤を標高-2000m, 解放基盤表面を標高0mとしている。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施するにあたって、既往の地下構造モデルに対して、地震基盤相当面を設定する。
- 实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②において、地震基盤相当面は、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層と定義されていることを踏まえて、標高-990m層上面を地震基盤相当面と設定する。

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q値
0~-56	56	2.1	1175	2660	100
-56~-250	194	2.2	1935	3230	100
-250~-430	180	1.9	1350	2700	100
-430~-990	560	1.9	1560	3100	100
-990~-2000	1010	2.5	2400	4500	100
-2000~	-	2.8	3500	6400	150

◁ 解放基盤表面

◁ 地震基盤相当面

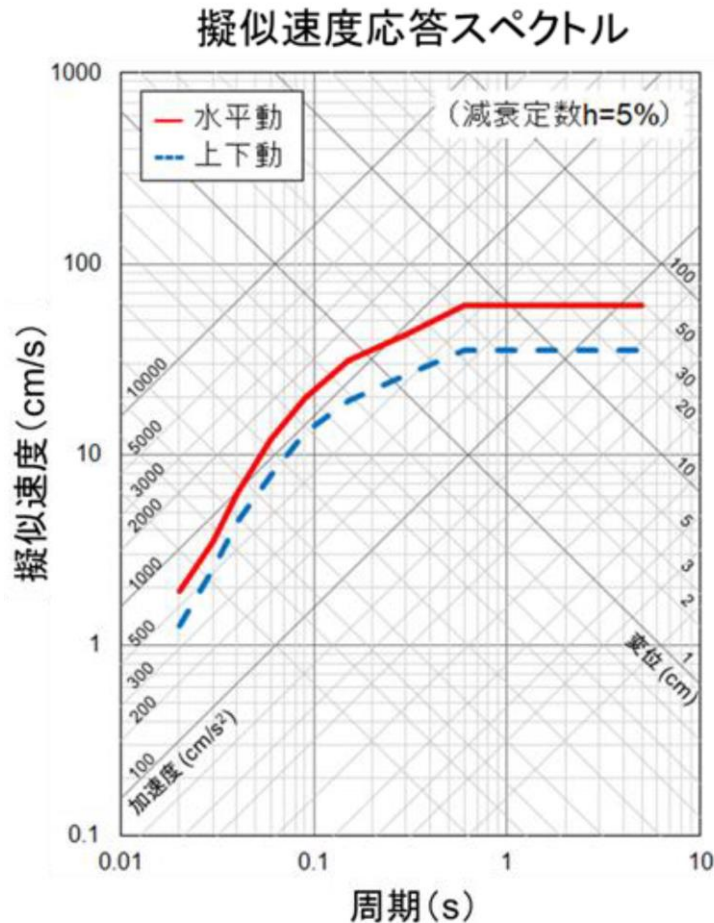
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

3. 模擬地震波の作成

3. 模擬地震波の作成

再掲 (R4.1.14審査会合資料)

- 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を作成する。
- 作成に際しては、複数の手法として下記の手法による検討を行う。
 - ・基準地震動の模擬地震波作成において適用実績のある乱數位相を用いた手法
 - ・震源を特定せず策定する地震動の特徴を反映できるよう、内陸地殻内地震におけるMw6.5程度未満の実観測記録の位相を用いた手法



コントロールポイント

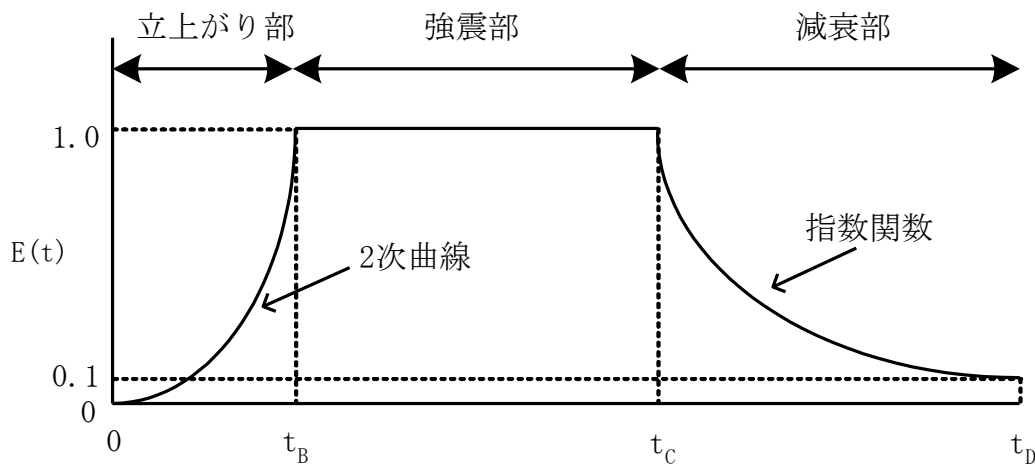
周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

「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」より抜粋
標準応答スペクトルおよびコントロールポイント

① 乱數位相を用いた模擬地震波の作成

乱數位相を用いた模擬地震波の作成

- 模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時的变化(M7.0, Xeq=10km)を採用し、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。
- 適合条件は、日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足させる。



$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t \leq t_B \\ 1 & t_B \leq t \leq t_C \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C}(t - t_C)} & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$

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

$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log(X_{eq}) - 0.6}$$

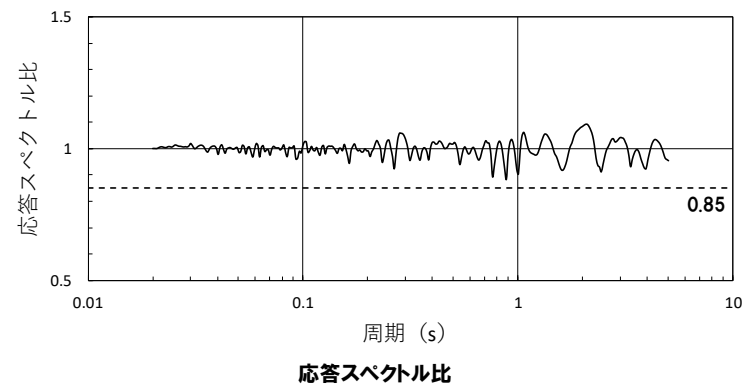
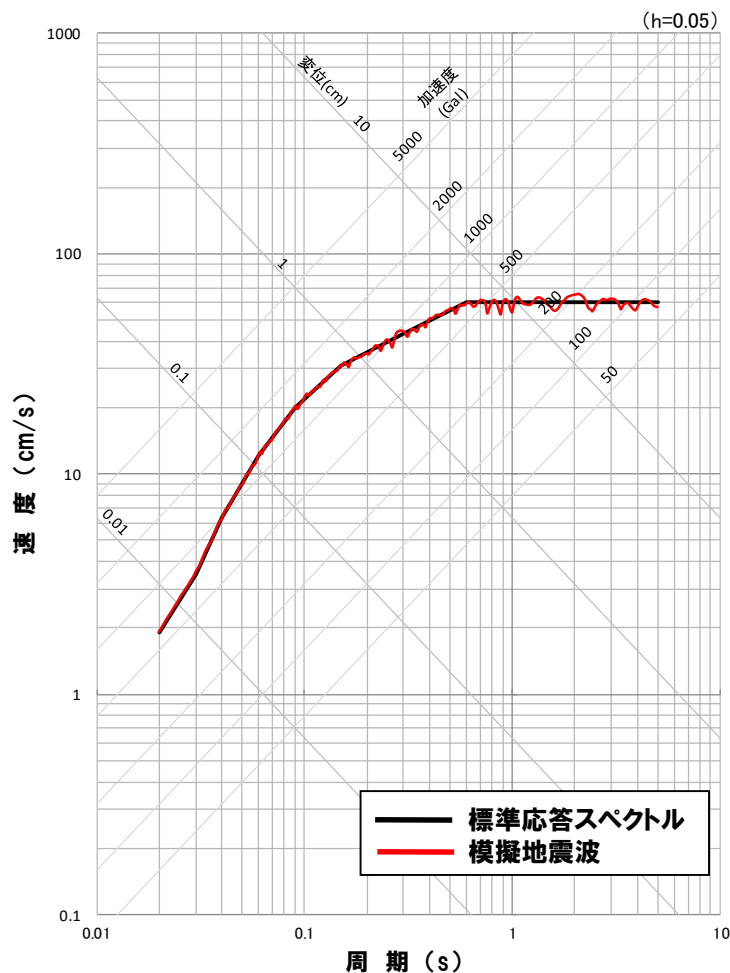
$$M7.0, X_{eq} = 10 \text{ km}$$

模擬地震波	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化(s)		
		t _B	t _C	t _D
水平方向	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直方向	29.8	3.7	16.3	29.8

※地震規模は、全国共通に考慮すべき地震の規模(Mw6.5程度未満)を踏まえ、主要動の継続時間を適切に設定する観点からM7.0とする。
 ※等価震源距離は、震源近傍を想定しXeq=10kmと設定する。

① 乱數位相を用いた模擬地震波の作成

乱數位相を用いた模擬地震波の作成結果(水平)



	作成結果
① 応答スペクトル比 $R(T)$	$0.88 \geq 0.85$
② SI比	$1.00 \geq 1.0$

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T: 周期 (s)

$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

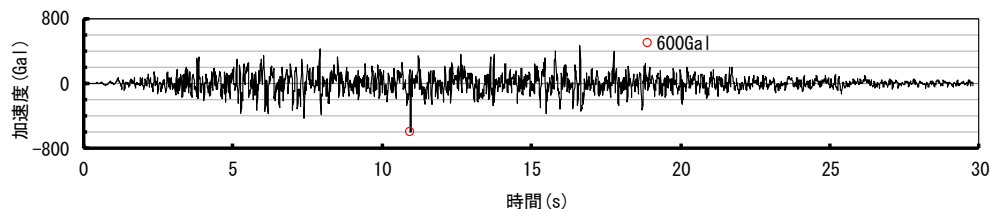
$$\textcircled{2} \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

SI: 応答スペクトル強さ

$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

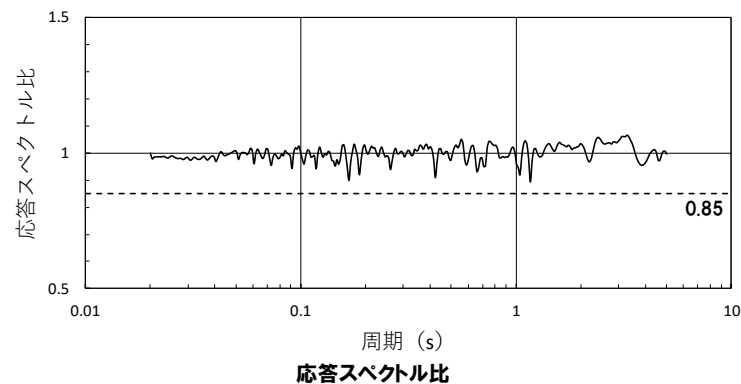
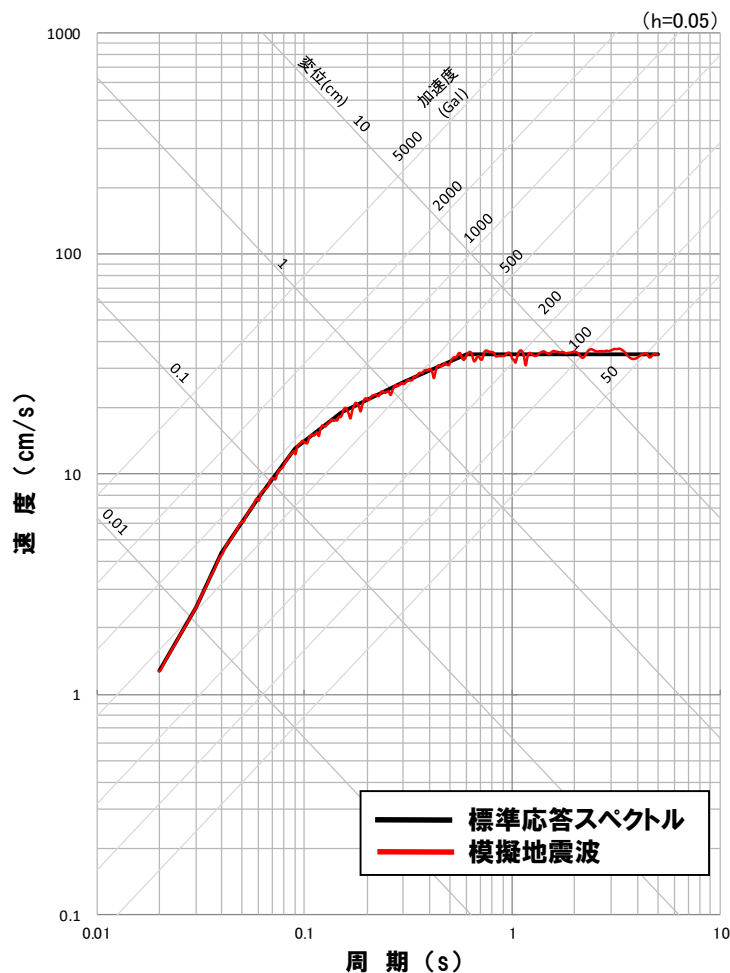
T: 固有周期 (s)



○作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

① 乱數位相を用いた模擬地震波の作成

乱數位相を用いた模擬地震波の作成結果(鉛直)



	作成結果
① 応答スペクトル比 $R(T)$	$0.89 \geq 0.85$
② SI比	$1.01 \geq 1.0$

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T: 周期(s)

$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル(cm/s)

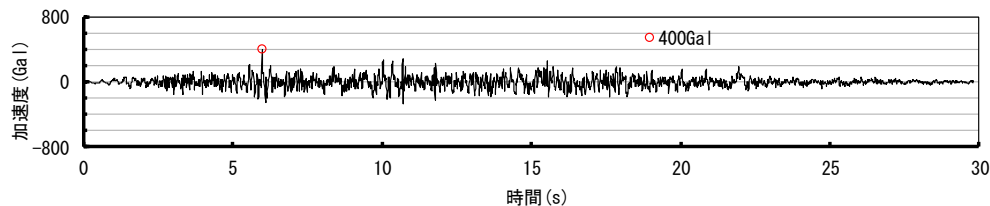
$$\textcircled{2} \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

SI: 応答スペクトル強さ

$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル(cm/s)

T: 固有周期(s)

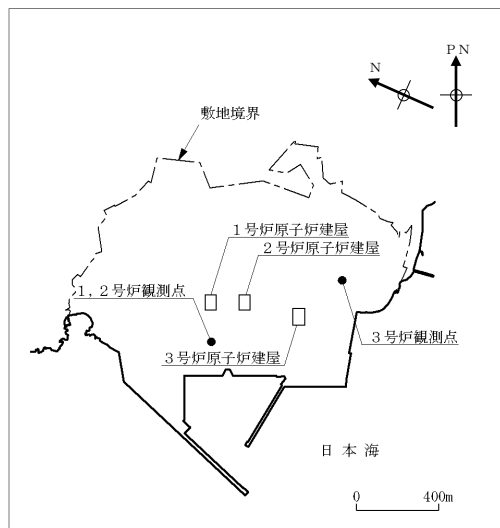


○作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

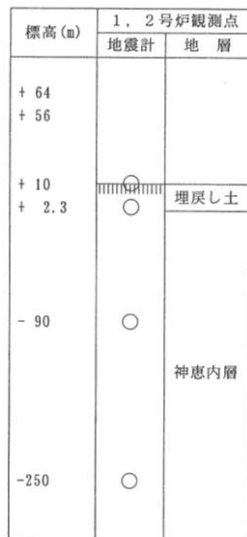
② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

一部加筆修正 (R4.1.14審査会合資料)

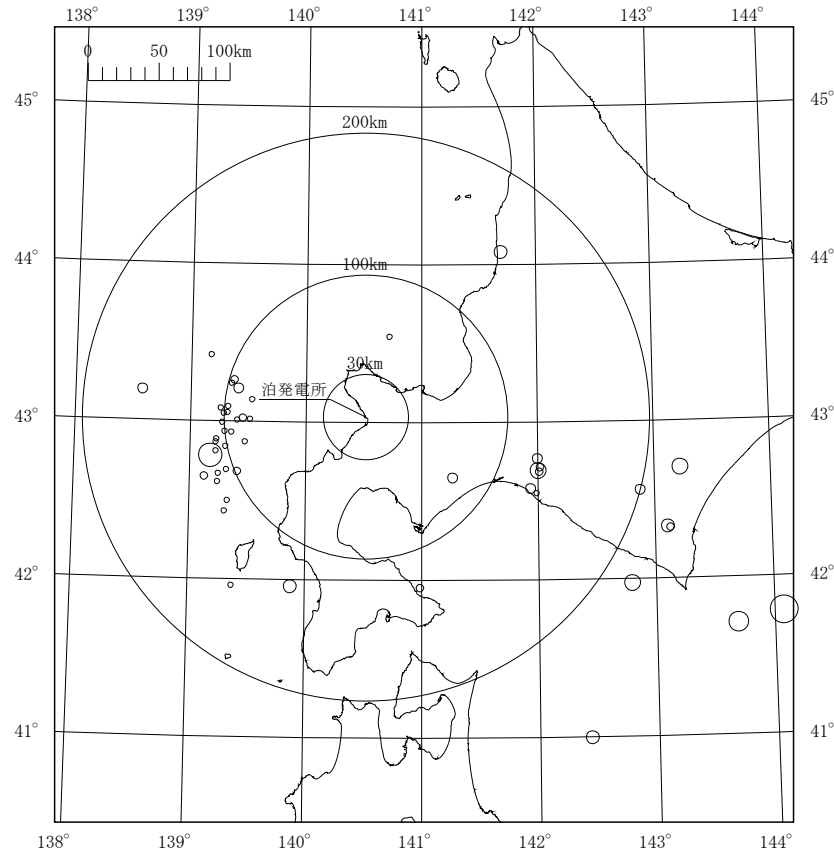
泊発電所における地震観測点および観測記録の震央分布図



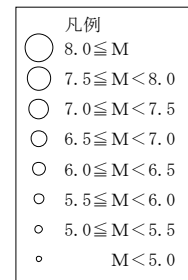
配置図



地震計の設置レベル



泊発電所における観測記録の震央分布図



○模擬地震波の位相として用いる観測記録としては、敷地近傍で発生したMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の敷地で得られた観測記録を用いるのが理想的と考えられる。

【泊発電所における地震観測記録】

- ・震央距離30km以内の地震観測記録なし(最短約60kmの海域の地震(M4.5))



○敷地において、標準応答スペクトルに適用できる地震観測記録は得られていない。

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

敷地周辺の観測点における観測記録の選定

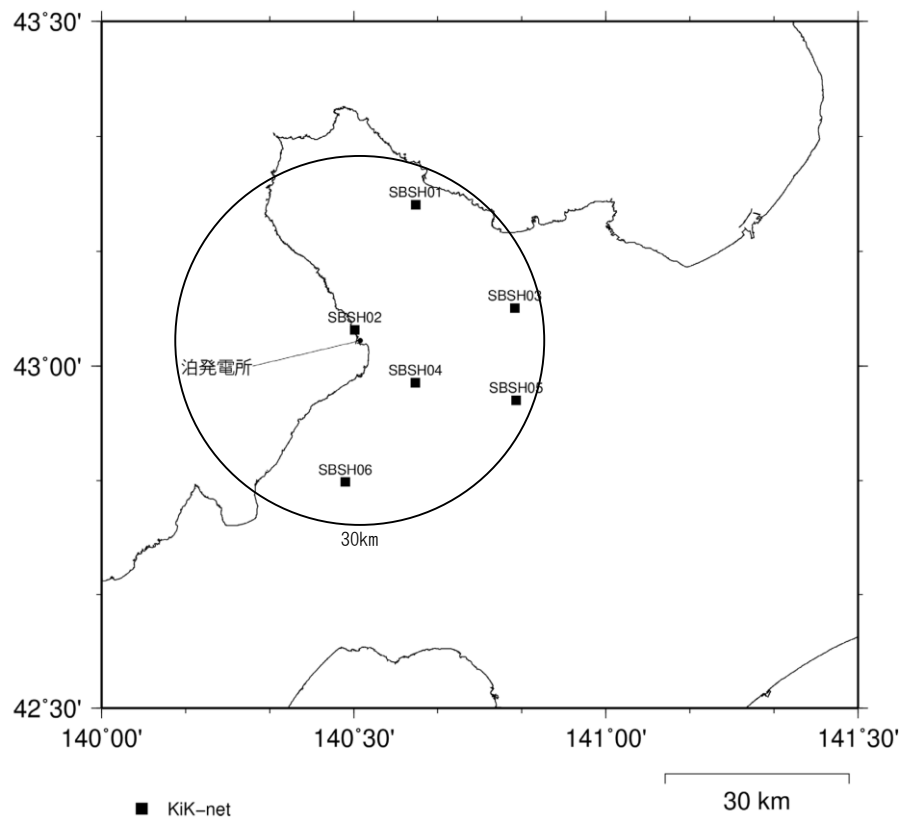
- 模擬地震波の位相として用いる観測記録としては、敷地近傍で発生したMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の敷地で得られた観測記録を用いるのが理想的と考えられるものの、敷地において、標準応答スペクトルに適用できる地震観測記録は得られていないことから、他機関の記録を用いた検討を実施する。
- 観測記録の収集にあたっては、震源特性に加えて、伝播特性に着目し、可能な限り敷地近傍の記録を収集するため、敷地周辺の防災科学技術研究所のKiK-net観測点から、以下に示す全ての条件を満たす内陸地殻内地震の観測記録を収集する。
- なお、令和4年1月14日審査会合においては、震源特性に着目し、他機関の記録として原子力規制委員会「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(以下、検討チーム)」における標準応答スペクトルの検討に用いられているKiK-net観測点の地震観測記録のうち、泊発電所と異なる地域の地震ではあるものの、規模の大きい逆断層の地震の観測記録を用いて検討を実施していた。
- しかしながら、会合での議論を踏まえ、震源特性に加えて、伝播特性に着目し、泊発電所周辺の観測点から観測記録を収集することとした。

	収集条件
	泊発電所周辺の観測点で得られた内陸地殻内地震（逆断層）の地震の観測記録を収集
観測記録の 収集条件	・ 泊発電所から半径30km以内の観測点で観測された地震
	・ 全国共通に考慮すべき地震動で想定される地震規模を踏まえ、M5.0以上の地震
	・ 震源近傍を想定し、震央距離30km以内で発生した地震
	・ 内陸地殻内地震として、震源深さ30km以内の地震

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

泊発電所から半径30km以内の観測点

- 泊発電所から半径30km以内のKiK-net観測点を下記に示す。
- M5.0以上の地震は泊発電所周辺では発生しておらず、周辺の観測点を含めても震央距離30km以内で観測された記録はない。
- なお、泊発電所から半径30km以内のKiK-net観測点の地盤情報の詳細を参考資料4.4に示す。
- 先に示した収集条件においては、模擬地震波の位相の検討に用いる観測記録が見つからなかったことから、地震規模、または、収集範囲の収集条件を拡大して、観測記録の収集を実施する。



観測点名			S波速度 V_s (m/s)	
			地表	地中
SBSH01	KiK-net	古平	550	1,370
SBSH02	KiK-net	泊	370	1,650
SBSH03	KiK-net	赤井川	180	730
SBSH04	KiK-net	共和	400	1,810
SBSH05	KiK-net	倶知安	230	1,730
SBSH06	KiK-net	蘭越	480	830

※S波速度：地震計位置のS波速度を示す。

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

敷地周辺の観測点における観測記録の収集条件の拡大(地震規模)

○敷地周辺の観測点における観測記録の収集条件のうち、地震規模の収集条件を観測された全ての地震に拡大する。

	収集条件（ <u>下線部が収集条件を拡大した箇所</u> ） 泊発電所周辺の観測点で得られた内陸地殻内地震の地震の観測記録を収集
観測記録の 収集条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 泊発電所から半径30km以内の観測点で観測された地震
	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>観測された全ての規模の地震</u>
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 震源近傍を想定し、震央距離30km以内で発生した地震
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 内陸地殻内地震として、震源深さ30km以内の地震

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

収集した地震・観測点・地震記録の一覧

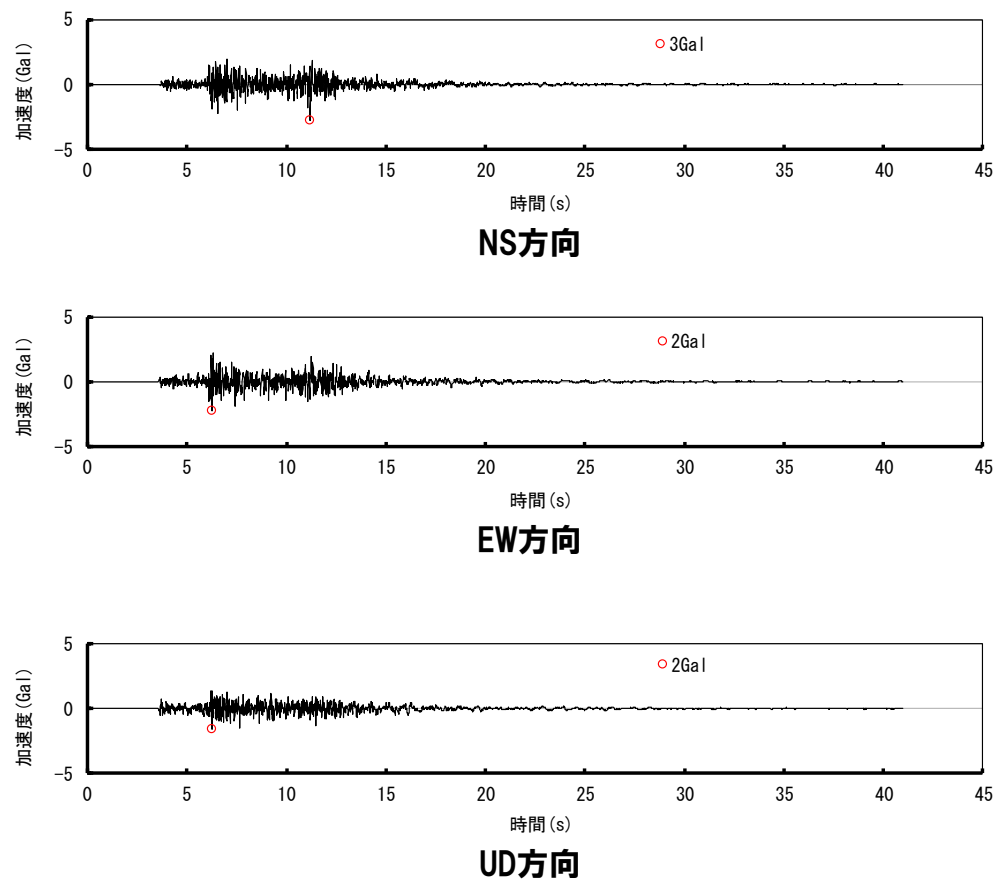
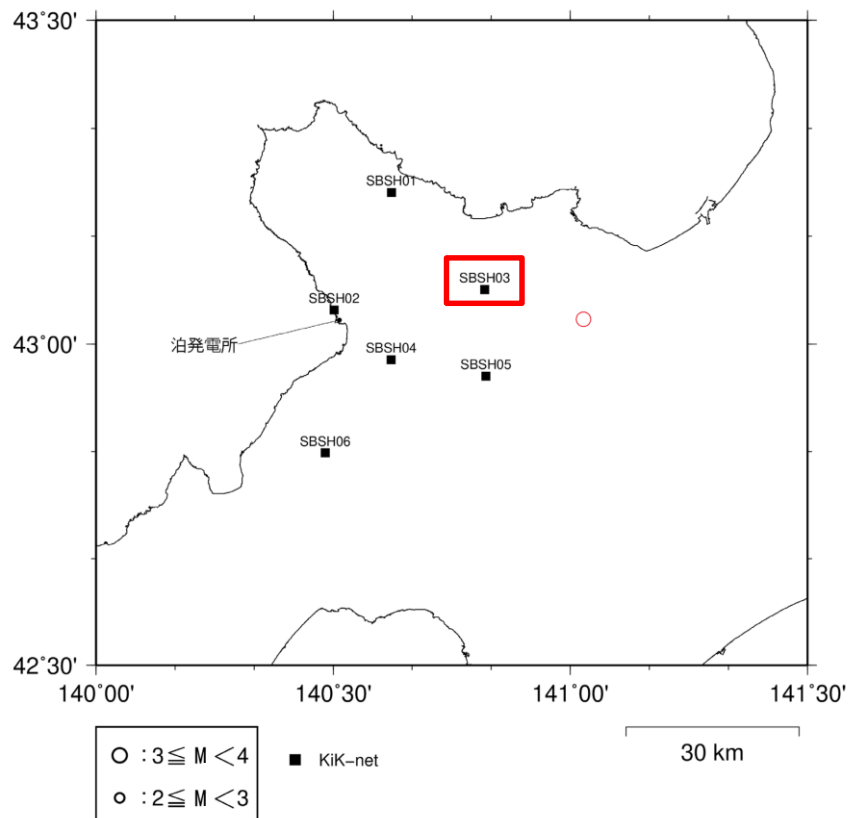
- 収集条件に適合する観測記録の一覧を下記に示す。
- 次頁以降に収集条件に適合する観測記録の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。
- なお、次頁以降に示す観測記録は、地中観測点の波形を示す。

No	地震発生時刻	震央地名	地震規模 (M)	震源深さ (km)	観測点名	震央距離 (km)	地中 S 波速度 Vs (m/s)	観測記録の最大加速度 (Gal)
1	2001/11/27 13:28:31	後志地方	3.8	1	SBSH03 赤井川	18	730	3
					SBSH05 倶知安	19	1,730	3
2	2010/08/14 09:11:00	後志地方	2.5	4	SBSH05 倶知安	26	1,730	0.4
3	2017/08/13 19:40:18	後志地方	3.5	2	SBSH03 赤井川	14	730	2
					SBSH04 共和	28	1,810	0.5

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net赤井川の観測記録(2001/11/27後志地方の地震(M3.8))

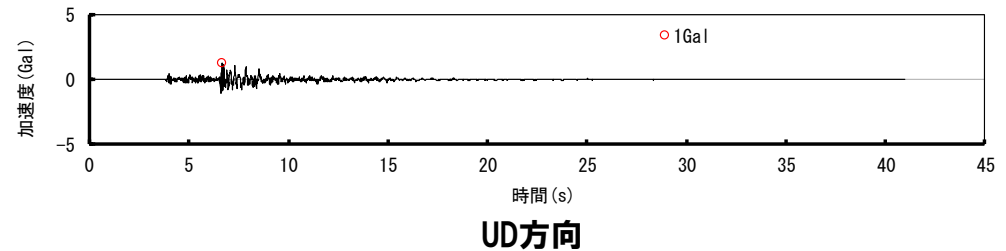
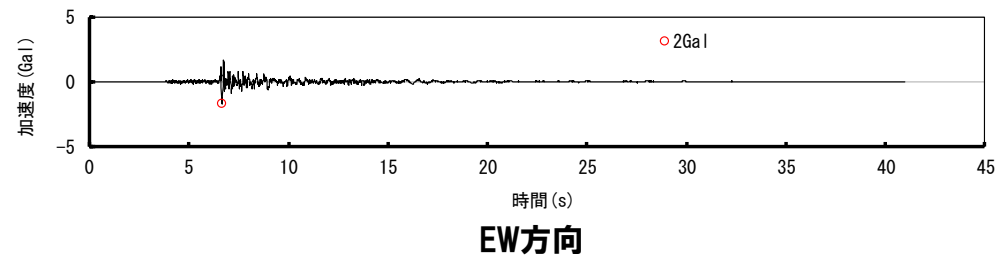
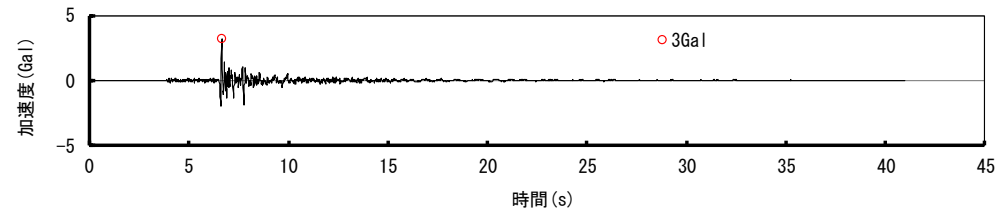
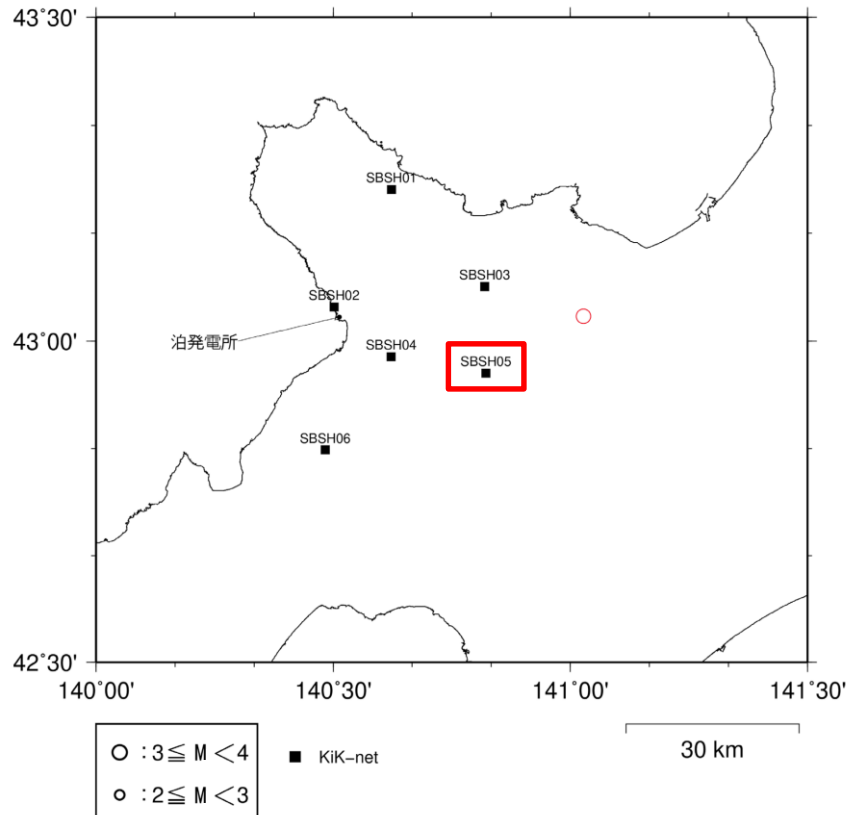
○下にKiK-net赤井川で観測された2001/11/27後志地方の地震(M3.8)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net倶知安の観測記録(2001/11/27後志地方の地震(M3.8))

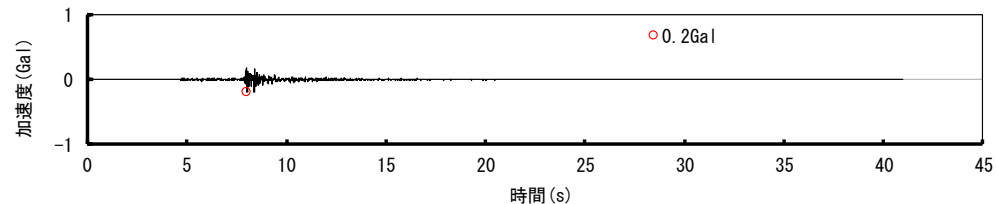
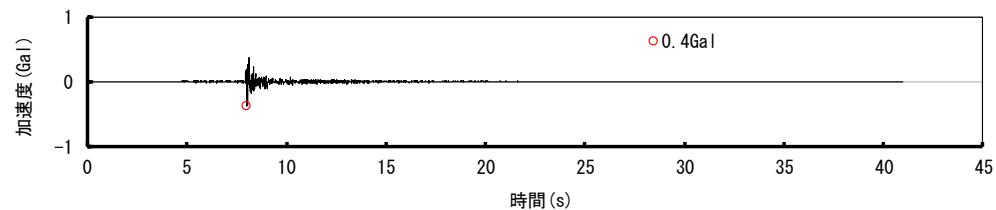
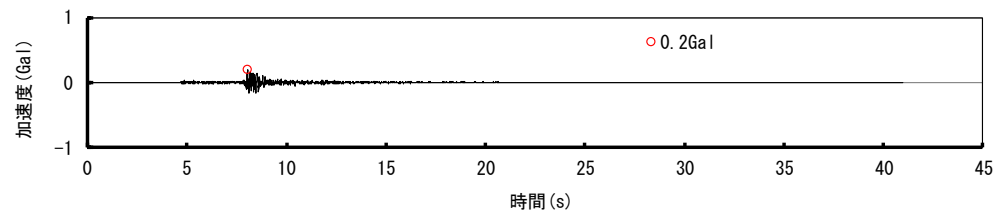
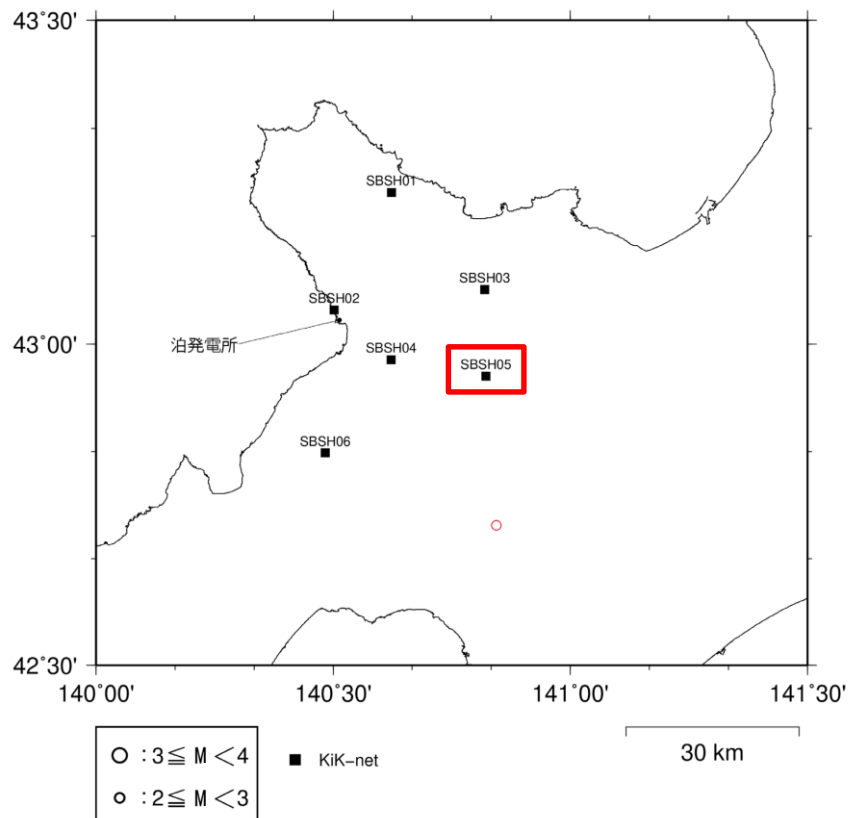
○下にKiK-net倶知安で観測された2001/11/27後志地方の地震(M3.8)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net倶知安の観測記録(2010/8/14後志地方の地震(M2.5))

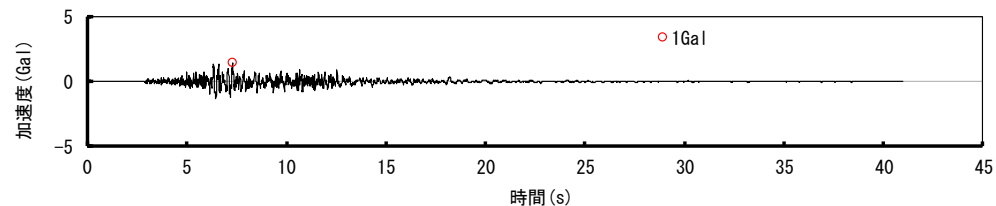
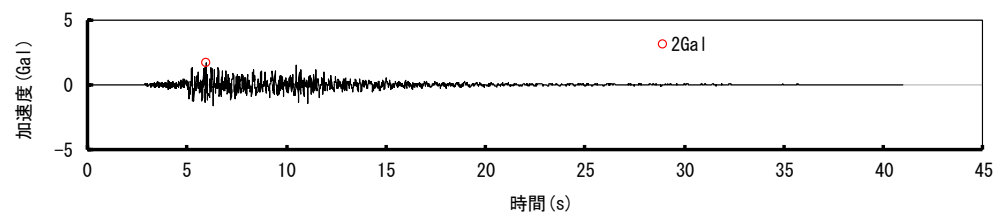
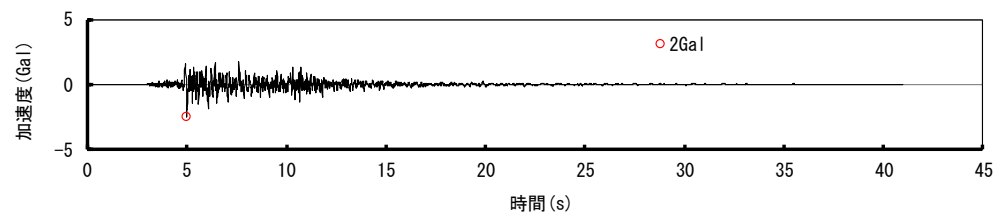
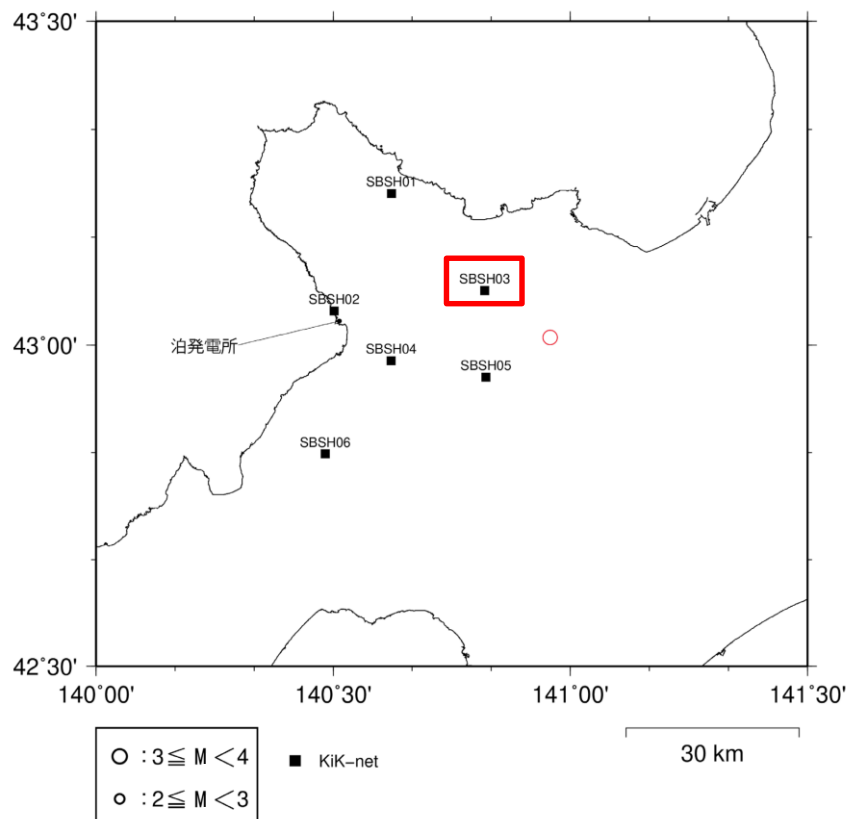
○下にKiK-net倶知安で観測された2010/8/14後志地方の地震(M2.5)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net赤井川の観測記録(2017/8/13後志地方の地震(M3.5))

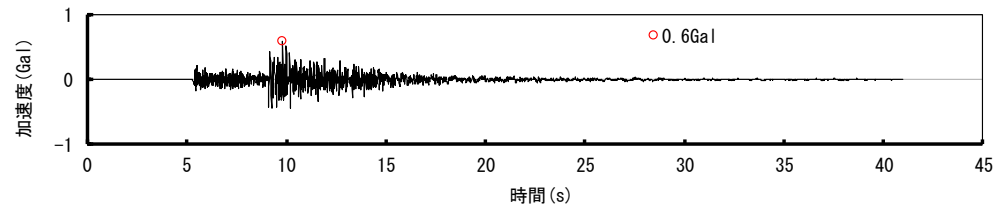
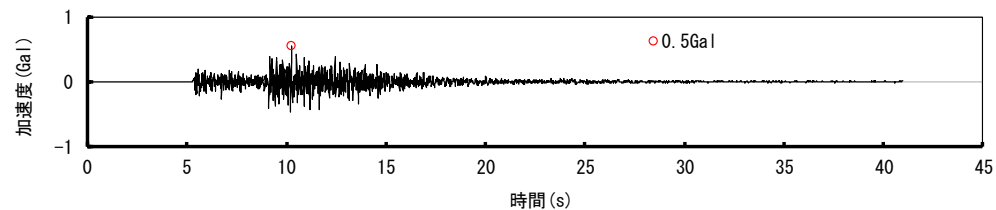
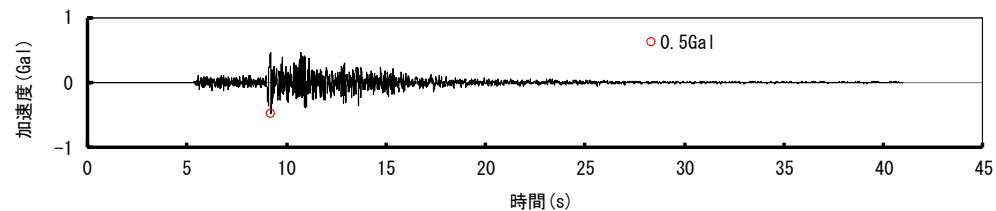
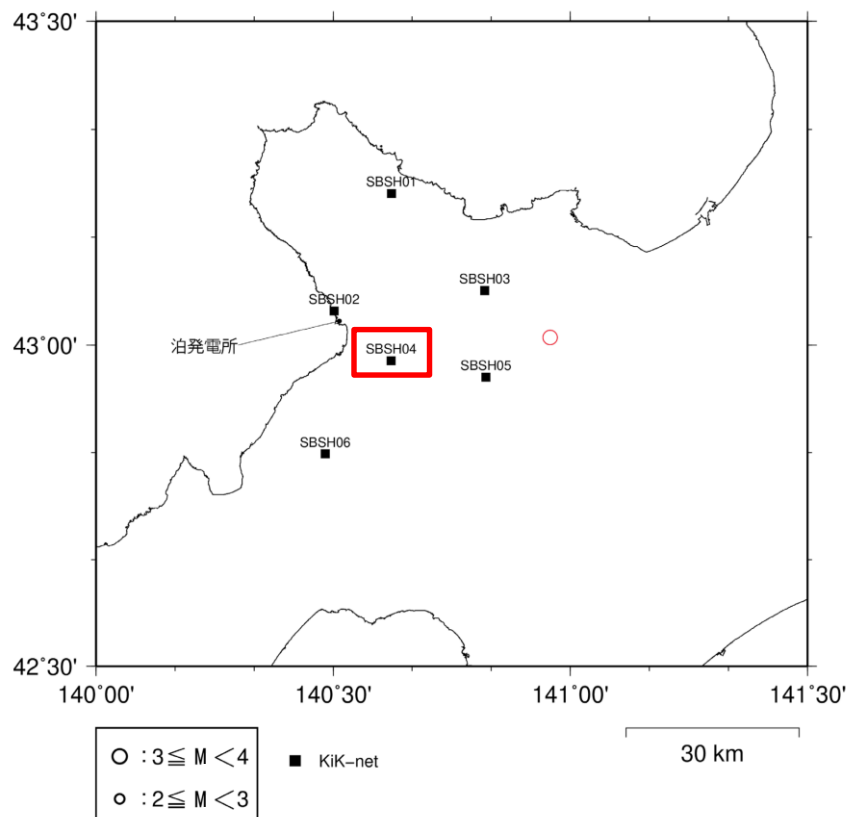
○下にKiK-net赤井川で観測された2017/8/13後志地方の地震(M3.5)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net共和の観測記録(2017/8/13後志地方の地震(M3.5))

○下にKiK-net共和で観測された2017/8/13後志地方の地震(M3.5)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

敷地周辺の観測点における観測記録の収集条件の拡大(収集範囲)

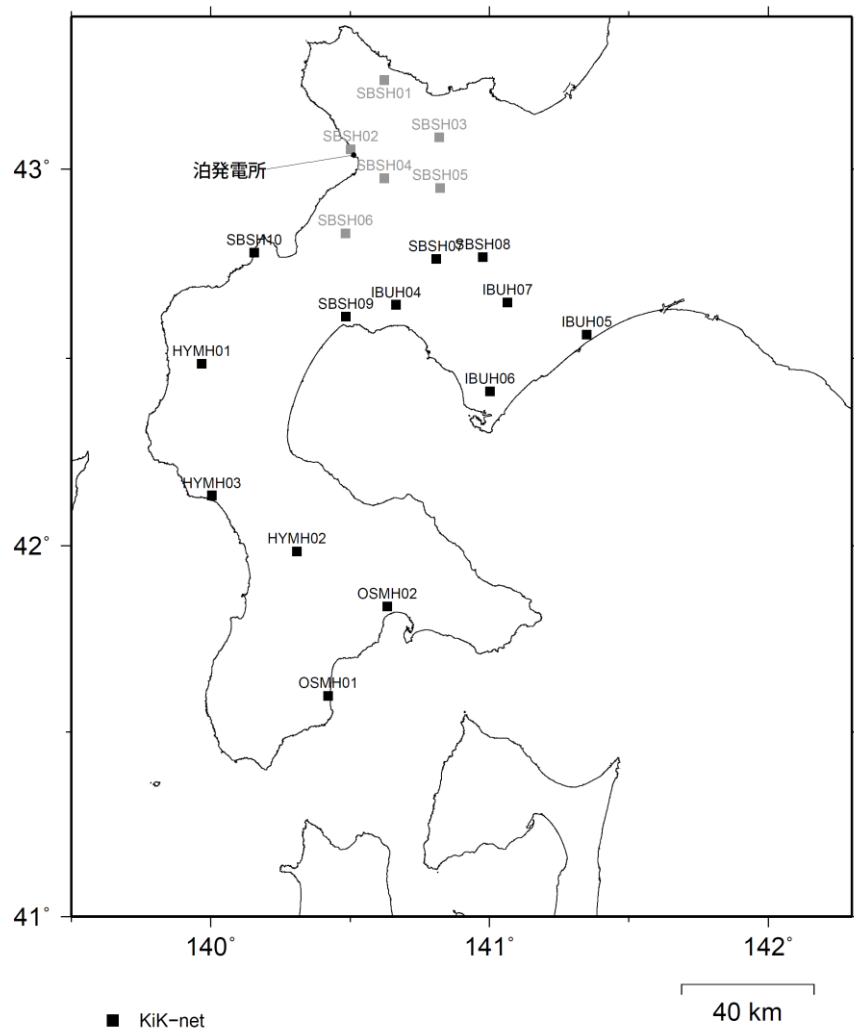
○敷地周辺の観測点における観測記録の収集条件のうち、地震観測記録の収集範囲を北海道西部に位置するKiK-net観測点に拡大する。

	収集条件 (下線部が収集条件を拡大した箇所)
	泊発電所周辺の観測点で得られた内陸地殻内地震 (逆断層) の地震の観測記録を収集
観測記録の 収集条件	・ <u>北海道西部に位置するKiK-net観測点</u> で観測された地震
	・ 全国共通に考慮すべき地震動で想定される地震規模を踏まえ、M5.0以上の地震
	・ 震源近傍を想定し、震央距離30km以内で発生した地震
	・ 内陸地殻内地震として、震源深さ30km以内の地震

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

収集範囲の観測点位置

- 北海道西部に位置するKiK-net観測点を下記に示す。
○なお、北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報の詳細を参考資料4.5に示す。



観測点名			S波速度 V_s (m/s)	
			地表	地中
SBSH07	KiK-net	真狩	190	730
SBSH08	KiK-net	喜茂別	200	1,430
SBSH09	KiK-net	黒松内	520	1,460
SBSH10	KiK-net	島牧	380	1,070
IBUH04	KiK-net	豊浦	150	1,060
IBUH05	KiK-net	白老	170	790
IBUH06	KiK-net	室蘭	200	1,500
IBUH07	KiK-net	大滝	400	1,330
HYMH01	KiK-net	北檜山	110	990
HYMH02	KiK-net	厚沢部	170	860
HYMH03	KiK-net	熊石	150	1,300
OSMH01	KiK-net	知内	180	900
OSMH02	KiK-net	上磯	200	750

※SBSH01～06は泊発電所から半径30km以内の観測点

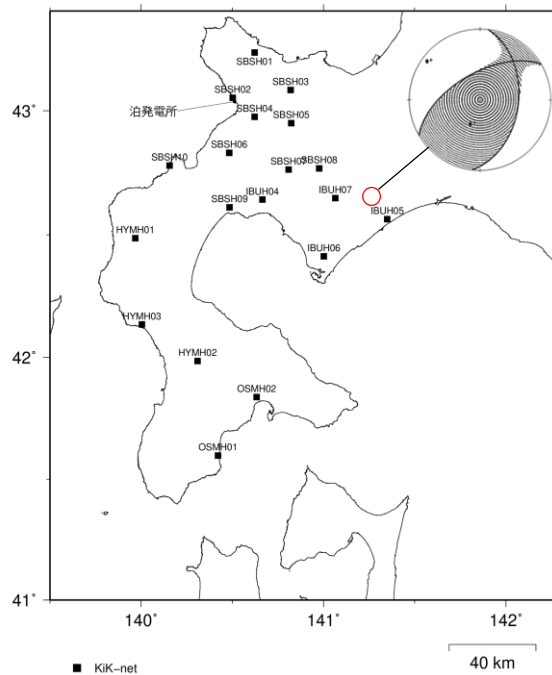
※S波速度：地震計位置のS波速度を示す。

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

収集した地震・観測点・地震記録の一覧

- 収集条件に適合する観測記録の一覧を下記に示す。
- 次頁以降に収集条件に適合する観測記録の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。
- なお、次頁以降に示す観測記録は、地中観測点の波形を示す。

No	地震発生時刻	震央地名	地震規模 (M)	震源深さ (km)	観測点名	震央距離 (km)	地中 S波速度 V_s (m/s)	観測記録の最大加速度 (Gal)
1	2014/07/08 18:05:24	胆振地方	5.6	3	IBUH05 白老	12	790	217
					IBUH07 大滝	17	1,330	68
					SBSH08 喜茂別	27	1,430	18

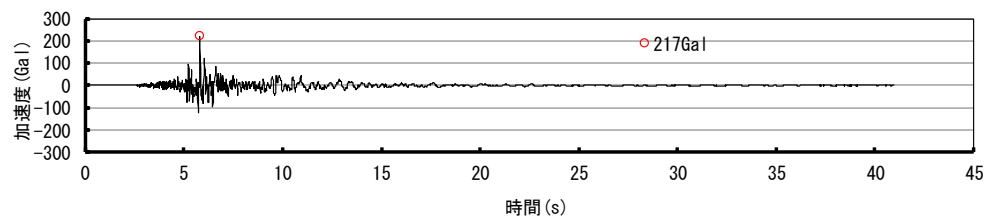
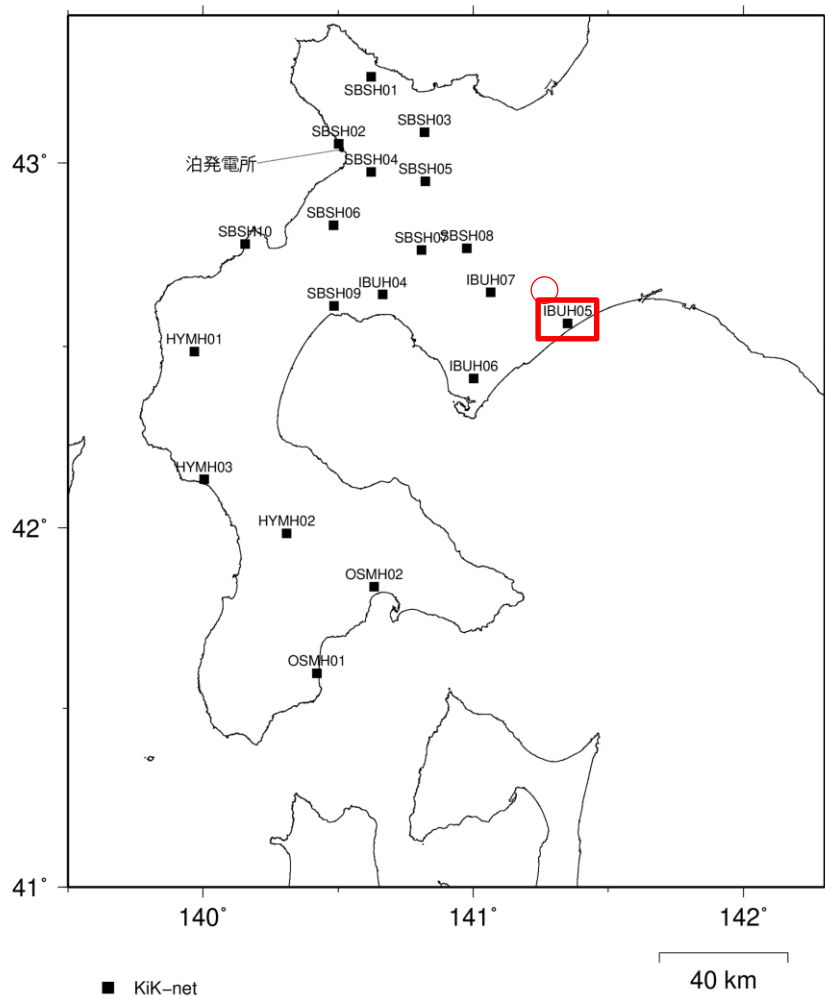


※メカニズム解:
防災科学技術研究所 F-net

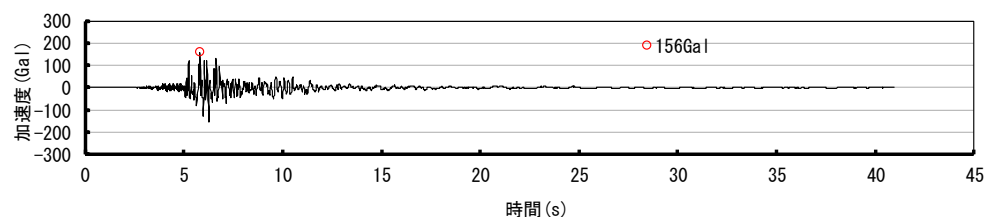
② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net白老の観測記録(2014/7/8胆振地方の地震(M5.6))

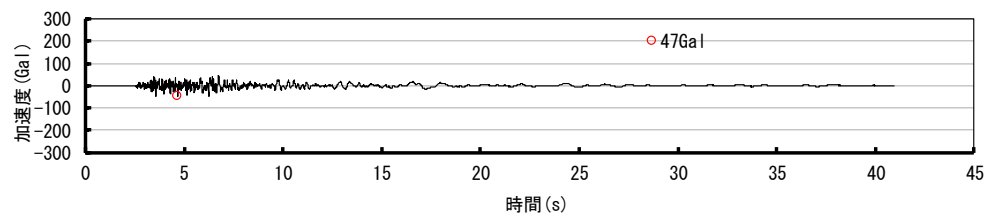
○下にKiK-net白老で観測された2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



NS方向



EW方向

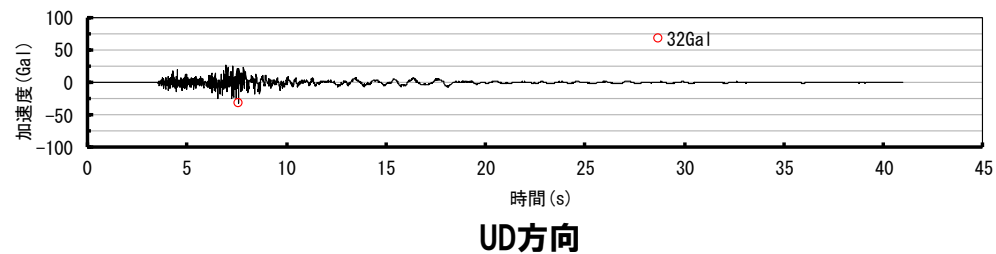
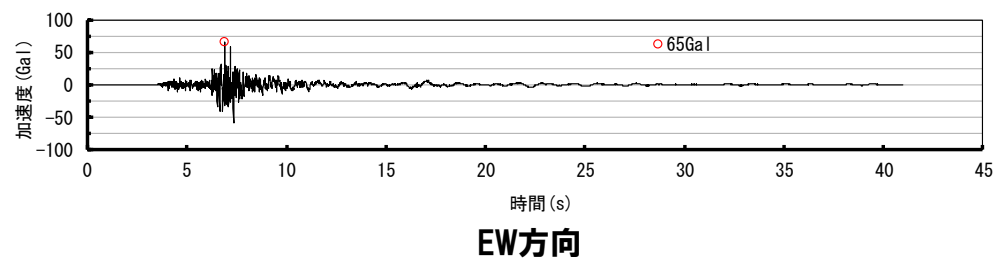
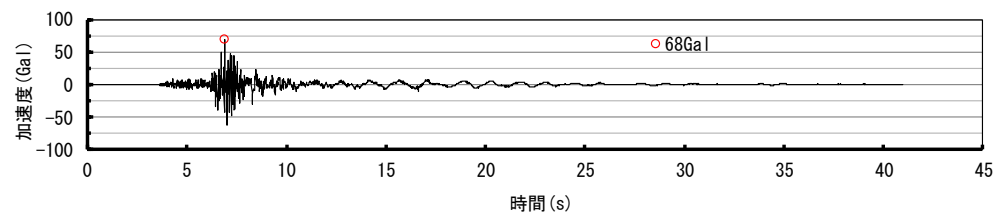
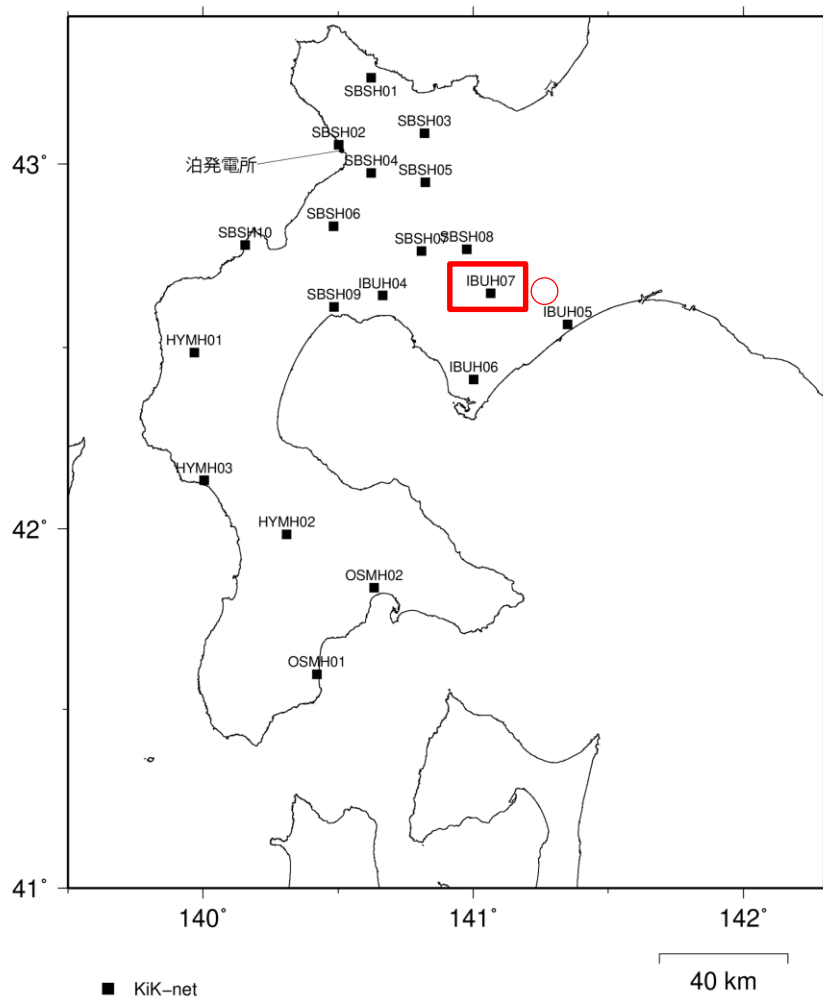


UD方向

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net大滝の観測記録(2014/7/8胆振地方の地震(M5.6))

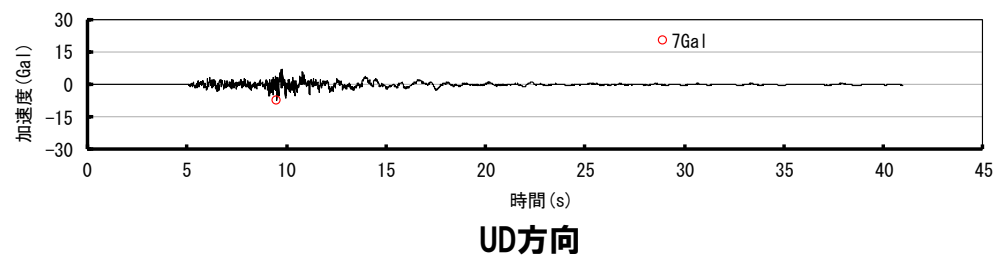
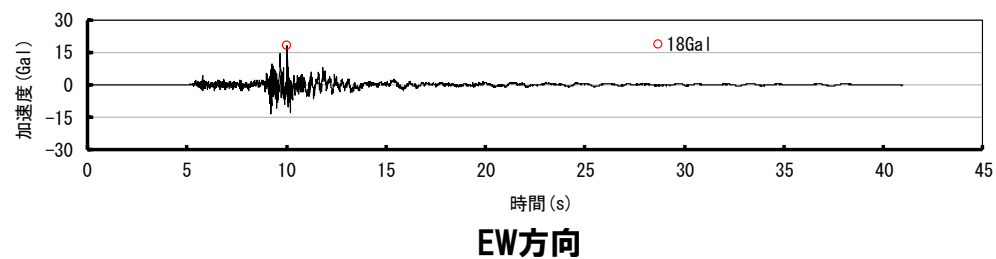
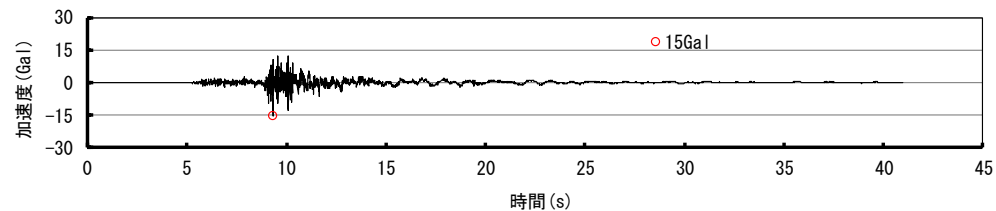
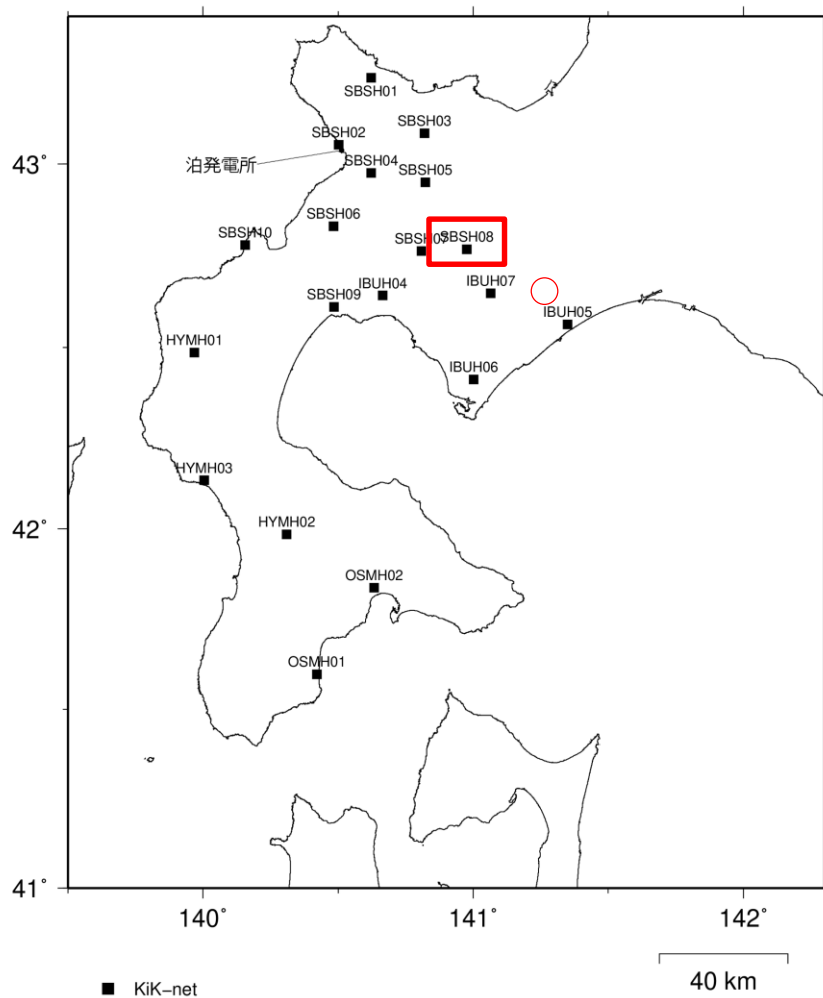
○下にKiK-net大滝で観測された2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。



② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

KiK-net喜茂別の観測記録(2014/7/8胆振地方の地震(M5.6))

○下にKiK-net喜茂別で観測された2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の震央分布および加速度時刻歴波形を示す。

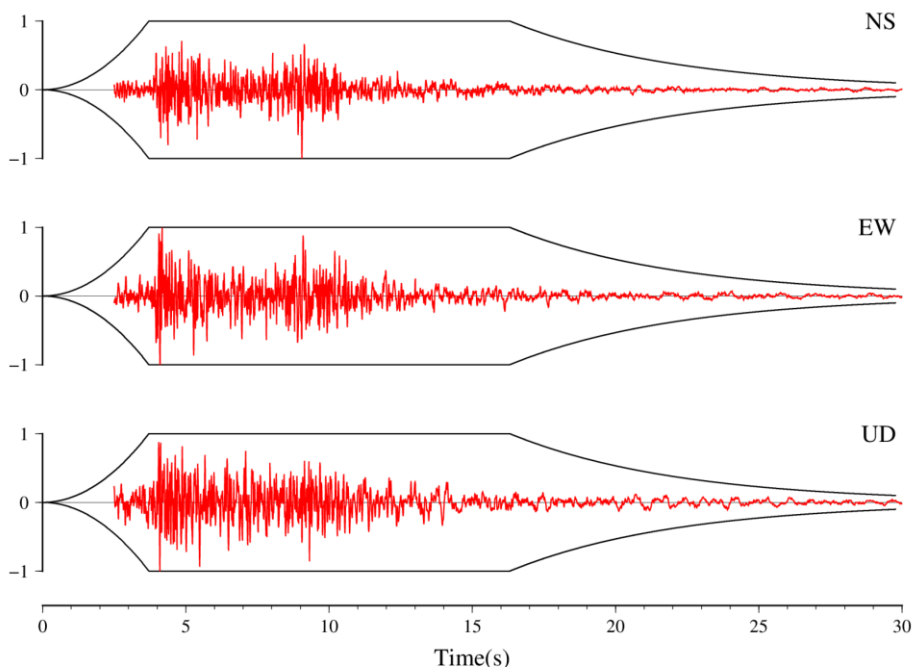


② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

収集した観測記録の確認および強震部の継続時間の確認

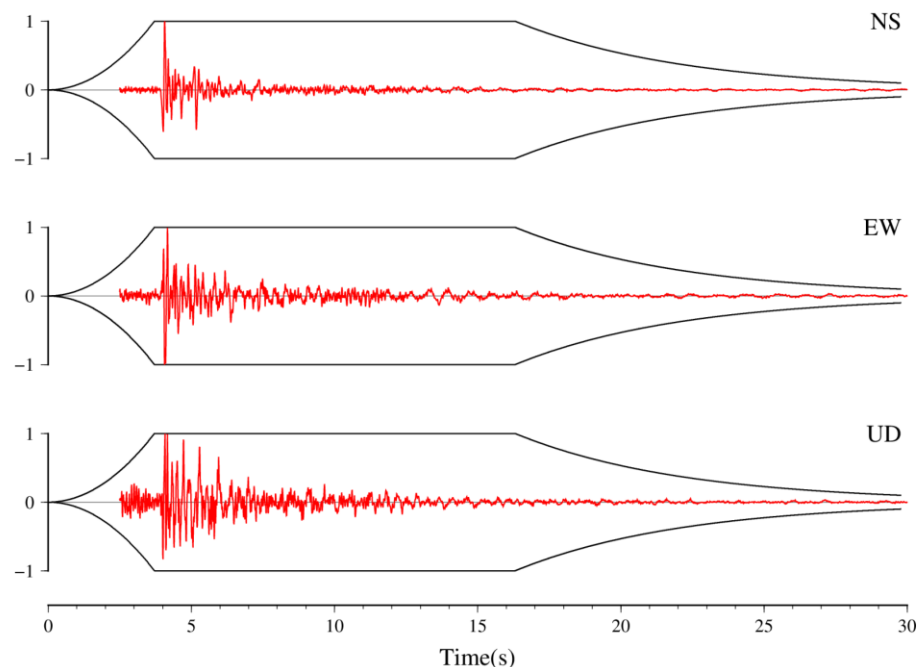
- 収集した8つの観測記録の加速度時刻歴波形の形状等を確認した。また、加速度時刻歴波形の最大振幅を基準化し、強震部の継続時間についても確認した。
- 比較のため、図に乱數位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定で用いたNoda et al. (2002)に基づく振幅包絡線(M7.0, $X_{eq}=10\text{km}$)を重ね描く。

2001/11/27後志地方の地震(M3.8)SBSH03赤井川の観測記録



— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0- $X_{eq}=10\text{km}$)
 — KiK-net赤井川の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

2001/11/27後志地方の地震(M3.8)SBSH05俱知安の観測記録

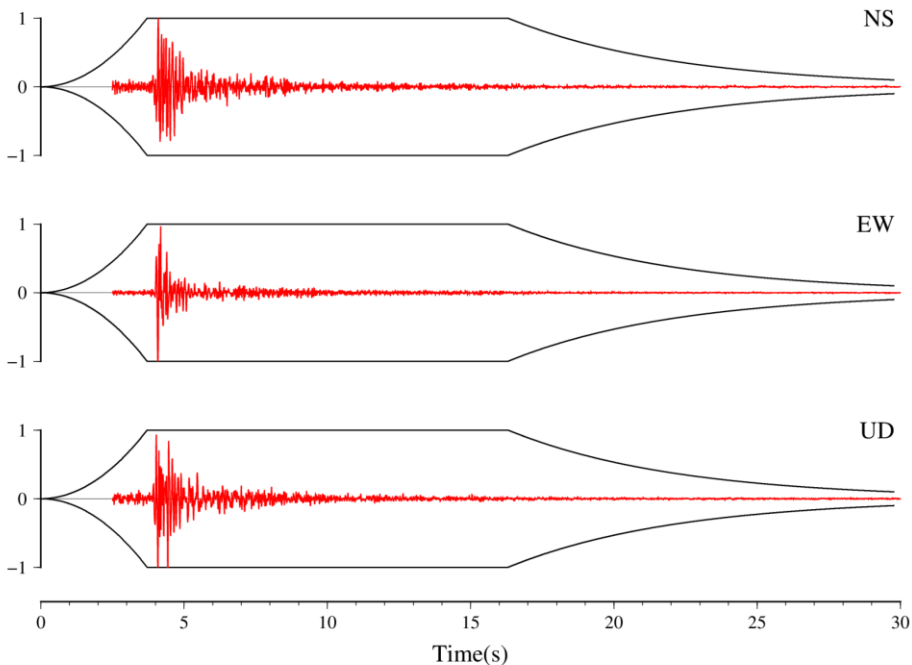


— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0- $X_{eq}=10\text{km}$)
 — KiK-net俱知安の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

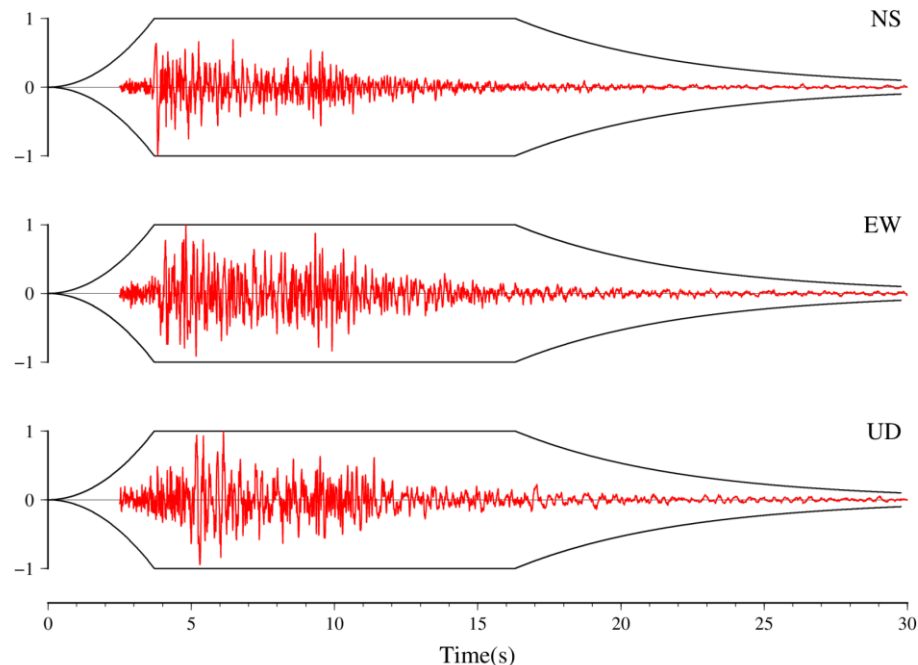
収集した観測記録の確認および強震部の継続時間の確認

2010/8/14後志地方の地震(M2.5)SBSH05倶知安の観測記録



— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0- $X_{eq}=10\text{km}$)
 — KiK-net倶知安の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

2017/8/13後志地方の地震(M3.5)SBSH03赤井川の観測記録

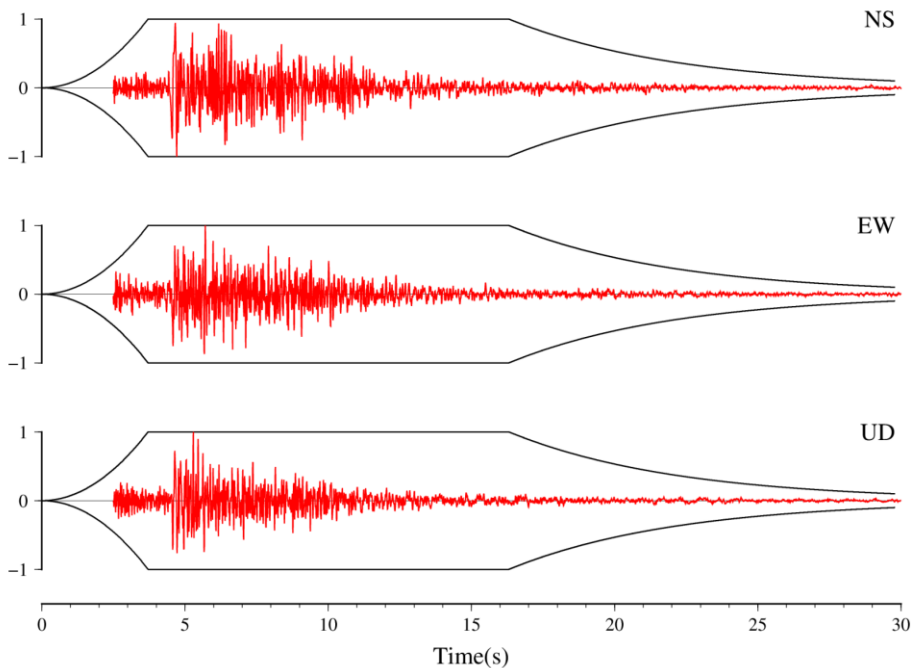


— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0- $X_{eq}=10\text{km}$)
 — KiK-net赤井川の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

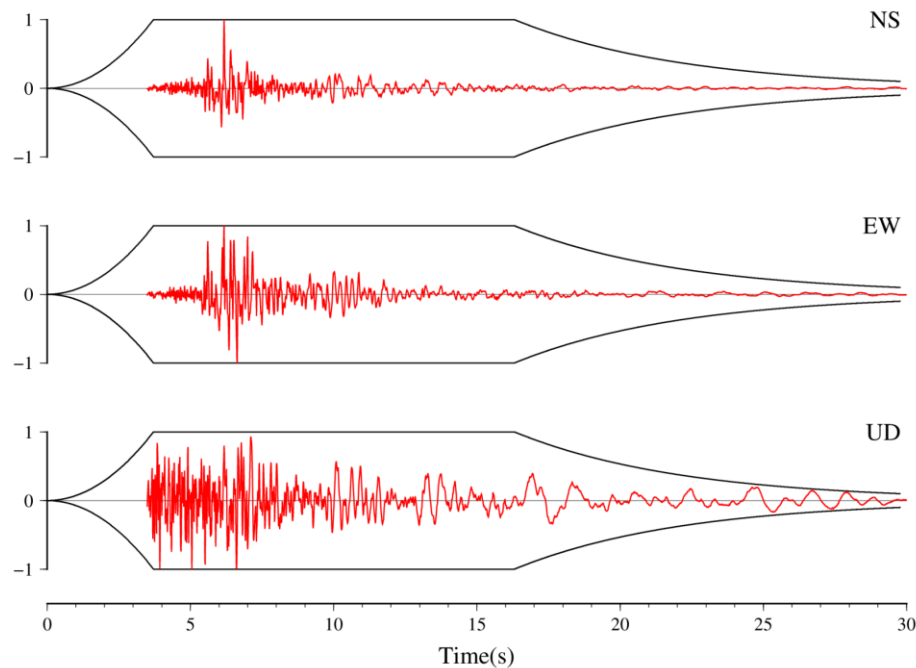
収集した観測記録の確認および強震部の継続時間の確認

2017/8/13後志地方の地震(M3.5)SBSH04共和の観測記録



— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0-Xeq10km)
 — KiK-net共和の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)IBUH05白老の観測記録

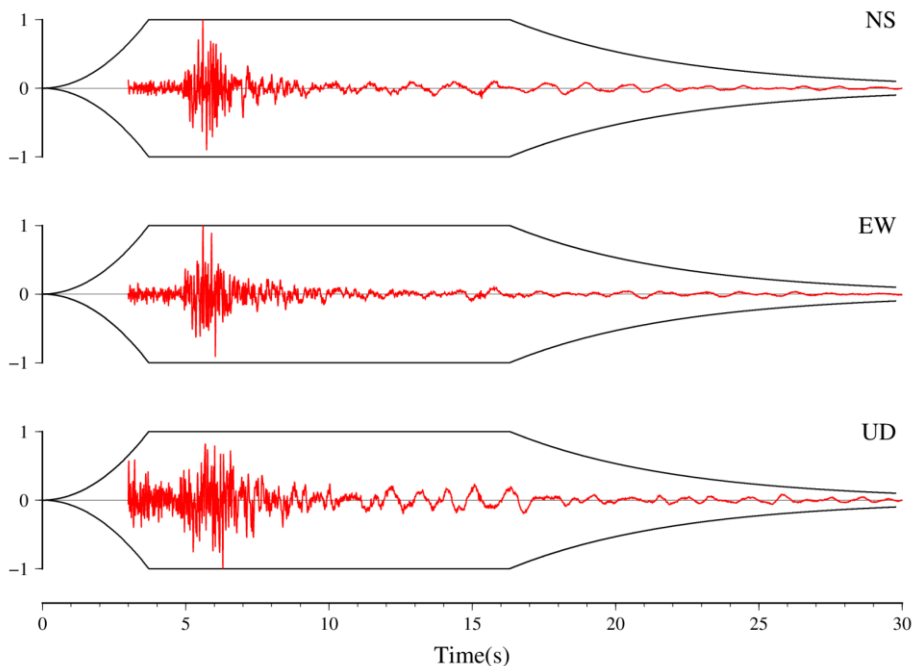


— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0-Xeq10km)
 — KiK-net白老の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

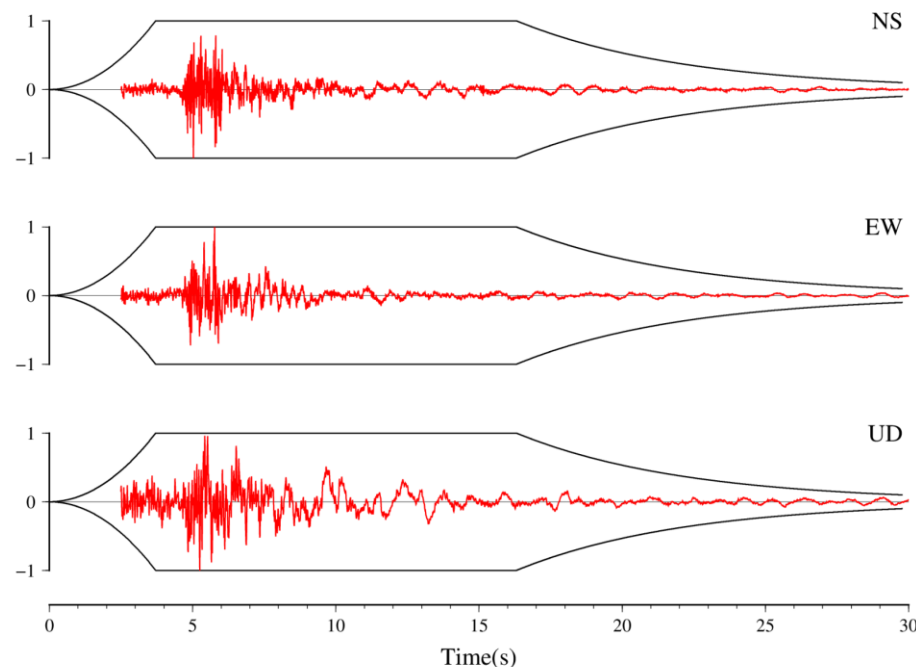
収集した観測記録の確認および強震部の継続時間の確認

2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)IBUH07大滝の観測記録



— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0-Xeq10km)
 — KiK-net大滝の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)SBSH08喜茂別の観測記録



— Noda et al. (2002) の振幅包絡線(M7.0-Xeq10km)
 — KiK-net喜茂別の観測記録の時刻歴波形(最大振幅を1に基準化)

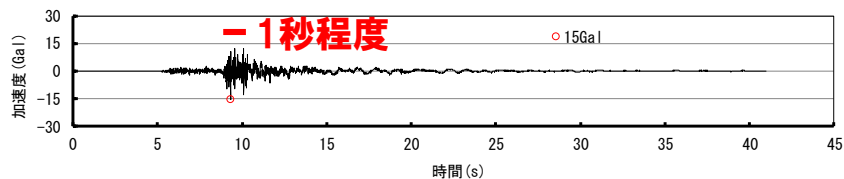
- 収集した8つの観測記録の加速度時刻歴波形は、パルス波や振幅の大きい後続波などの特徴的な形状の波形が見られない。
- また、規模の小さい地震の観測記録であることから、Noda et al. (2002) に基づき「M7.0-Xeq10km」から設定した強震部の継続時間よりも有意に短い。
- 以上より、収集した観測記録については、特異な形状の波形がないことを確認した。次頁以降、収集した観測記録を用いて模擬地震波の検討を実施する。

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

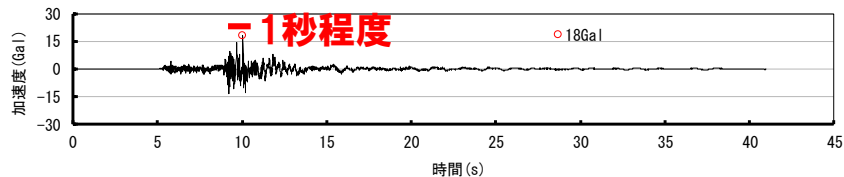
観測位相を用いた模擬地震波の検討に用いる観測記録の選定

- 収集した8つの観測記録の中で地震規模の大きい2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の観測記録のうち、地震基盤相当面のS波速度(2400m/s)との対応を考慮して観測点のS波速度が最も大きいSBSH08喜茂別(1430m/s)の記録を用いて模擬地震波の検討を実施する。
- なお、2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の観測記録が得られている観測点のうち、IBUH07大滝も比較的大きなS波速度(1330m/s)となっていることから、比較的振幅の大きい波(最大加速度値の0.5倍以上の振幅)の継続時間を確認したところ、SBSH08喜茂別の観測記録と同程度であることから、よりS波速度が大きいSBSH08喜茂別の記録を用いて模擬地震波の検討を実施する。
- また、収集した8つの観測記録のうち、地震規模の小さい2001/11/27後志地方の地震(M3.8)、2010/8/14後志地方の地震(M2.5)および2017/8/13後志地方の地震(M3.5)の観測記録は、観測された最大加速度が小さく、SN比が小さいことから、模擬地震波の検討に用いる観測記録として採用しない。

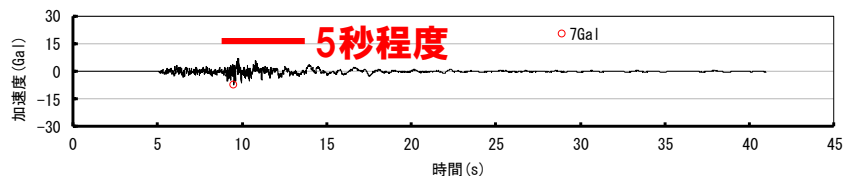
2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)SBSH08喜茂別の観測記録



NS方向

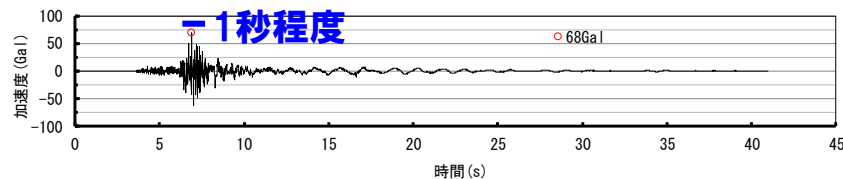


EW方向

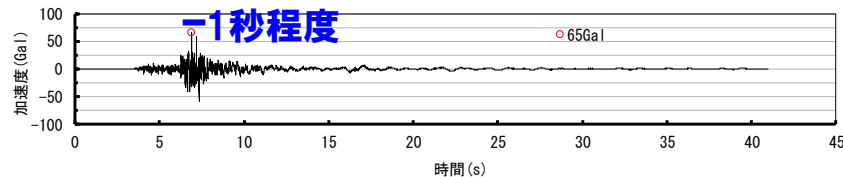


UD方向

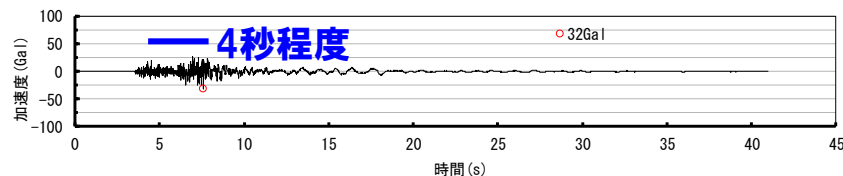
2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)IBUH07大滝の観測記録



NS方向



EW方向

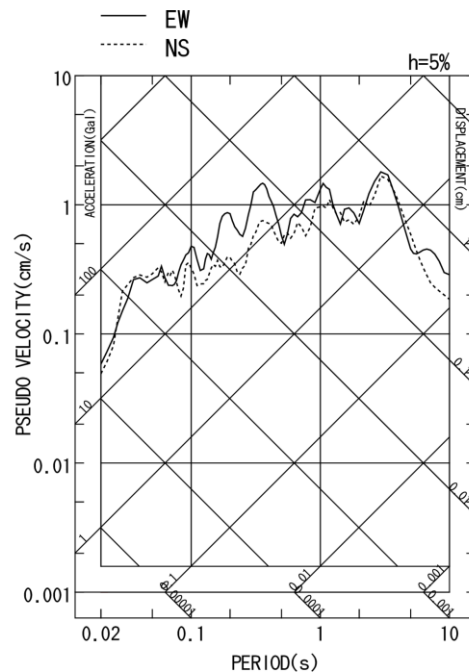


UD方向

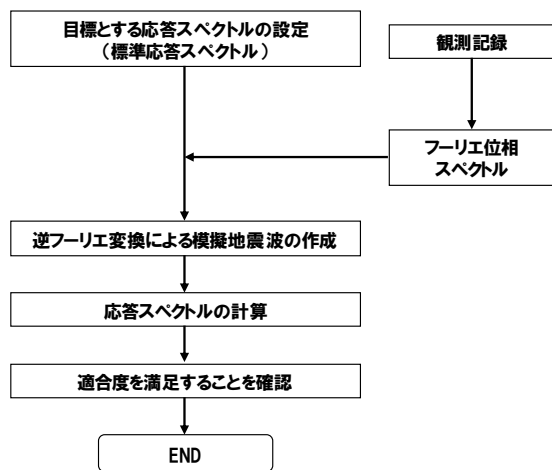
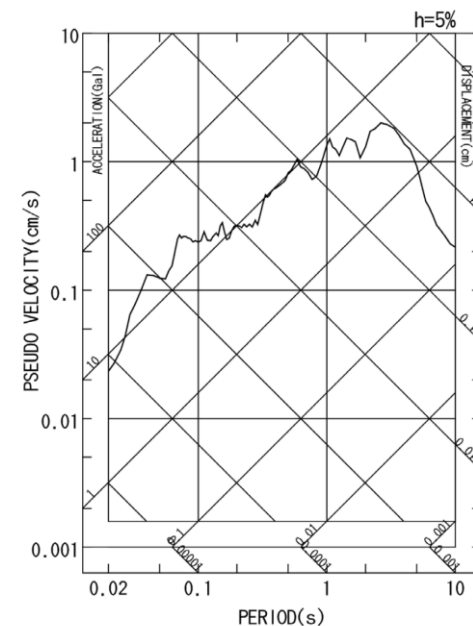
② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

- 泊発電所敷地周辺の観測点における観測記録を収集した結果、2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)SBSH08喜茂別の観測記録を模擬地震波作成に用いる観測記録として選定した。
- 選定した観測記録を用いて、以下の手順により観測記録を用いた模擬地震波を作成する。
- 観測位相を用いる際の経時特性は、実観測波の経時特性として、観測記録のフーリエ位相スペクトルを反映する。
- 適合条件は、日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足させる。
- なお、水平方向については、応答スペクトルの形状や最大加速度を踏まえ、EW方向を用いて検討する。

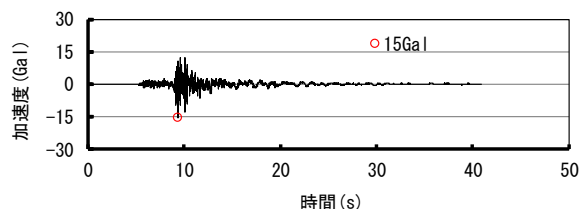
実観測記録(水平方向)



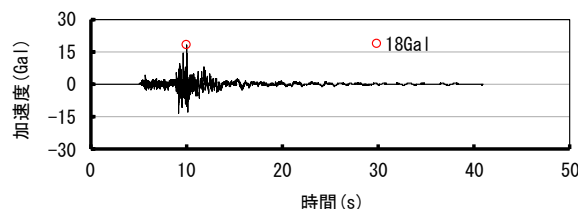
実観測記録(鉛直方向)



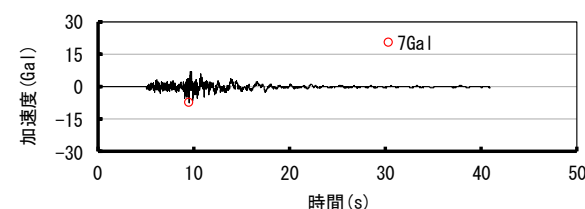
模擬地震波の作成手順



NS方向



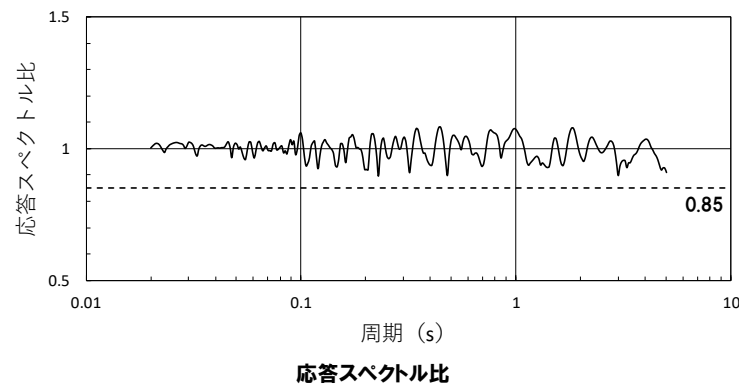
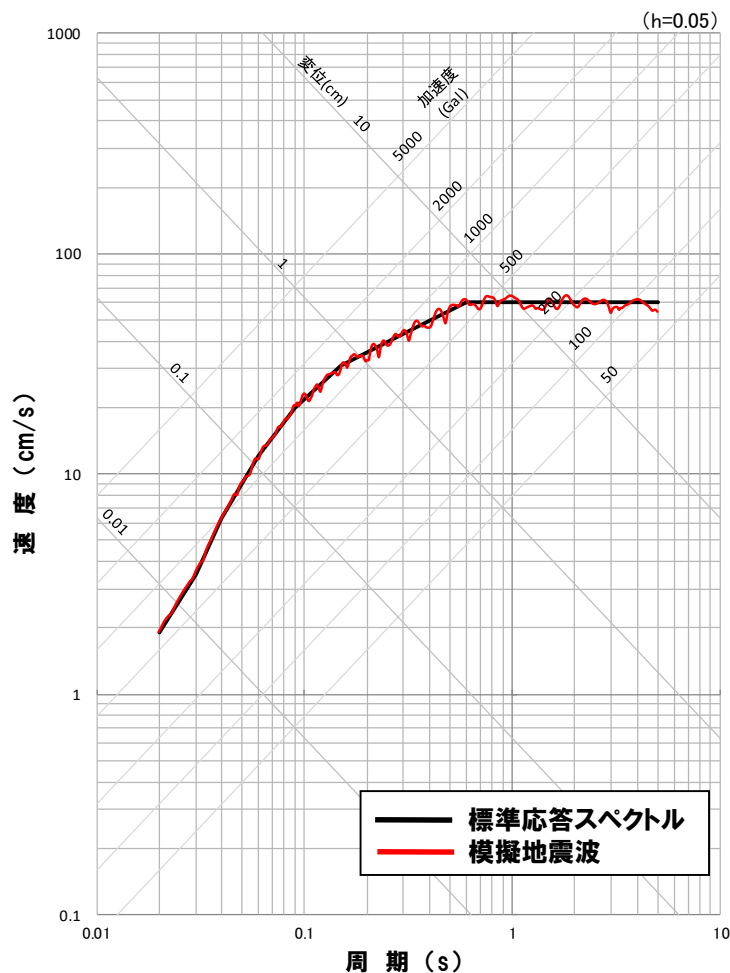
EW方向



UD方向

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

観測位相を用いた模擬地震波の作成結果(水平方向)



	作成結果
① 応答スペクトル比 $R(T)$	$0.90 \geq 0.85$
② SI比	$1.00 \geq 1.0$

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T: 周期 (s)

$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

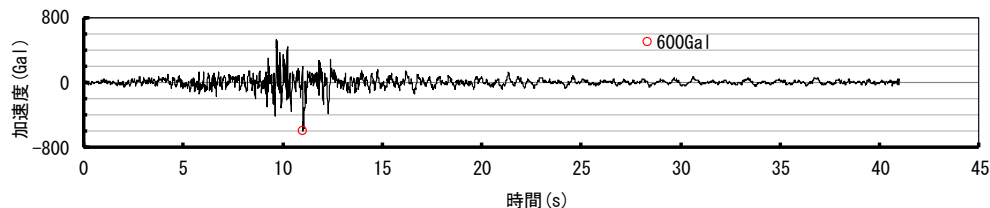
$$\textcircled{2} \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

SI: 応答スペクトル強さ

$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

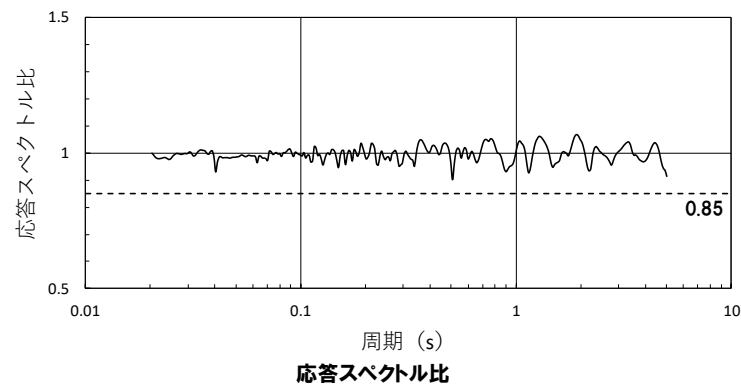
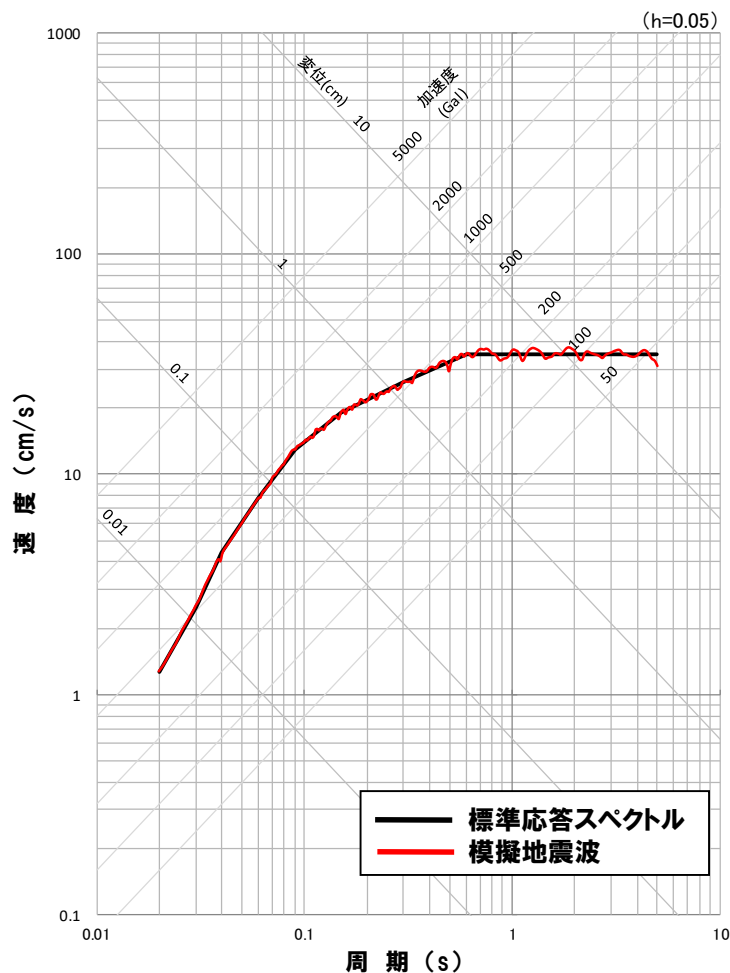
T: 固有周期 (s)



○作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

② 観測位相を用いた模擬地震波の検討

観測位相を用いた模擬地震波の作成結果(鉛直方向)



	作成結果
① 応答スペクトル比 $R(T)$	$0.88 \geq 0.85$
② SI比	$1.00 \geq 1.0$

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T: 周期 (s)

$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

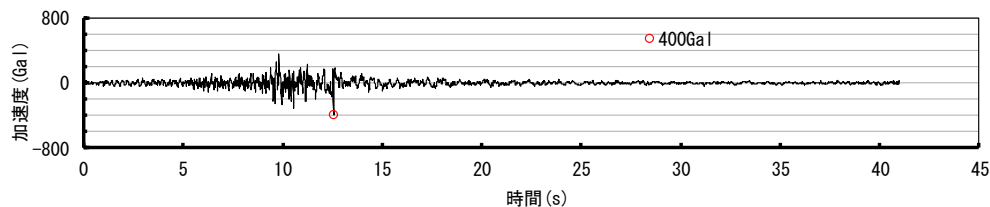
$$\textcircled{2} \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

SI: 応答スペクトル強さ

$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T: 固有周期 (s)



○ 作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

③ 解放基盤表面における地震動の設定

一部加筆修正 (R4.1.14審査会合資料)

○地震基盤相当面における模擬地震波を用いて、1次元波動論により、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、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設定。

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	減衰定数 (%)
0~-56	56	2.1	1175	2660	0.5
-56~-250	194	2.2	1935	3230	0.5
-250~-430	180	1.9	1350	2700	0.5
-430~-990	560	1.9	1560	3100	0.5
-990~-2000	1010	2.5	2400	4500	0.5
-2000~	-	2.8	3500	6400	0.33

▽解放基盤表面

1次元波動論による
地震波の伝播特性の反映

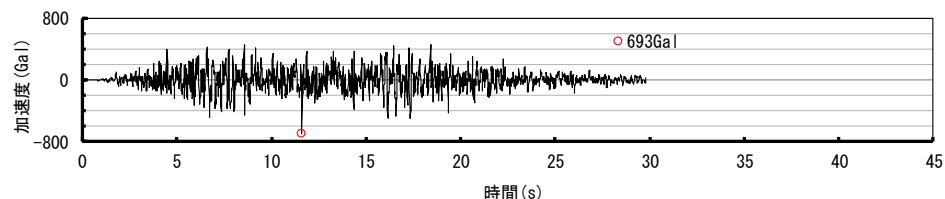
▽地震基盤相当面

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

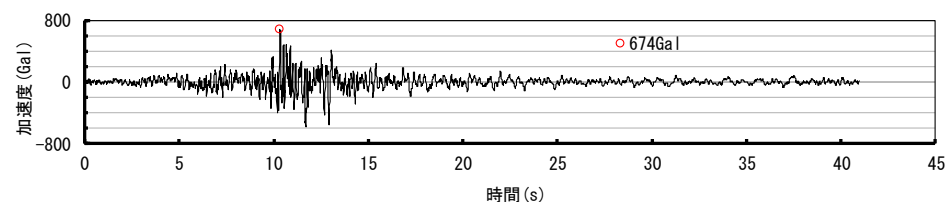
③ 解放基盤表面における地震動の設定

○「3. ①乱数位相を用いた模擬地震波の作成」および「3. ②観測位相を用いた模擬地震波の検討」で検討した2波について、「2. 地下構造モデルの設定」で検討した地下構造モデルを用いて、解放基盤表面での模擬地震波を評価する。

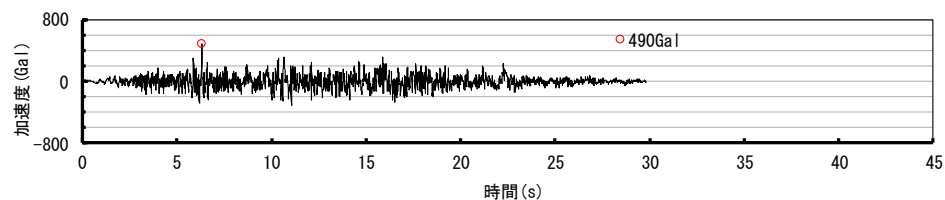
乱数位相波__加速度時刻歴波形(水平方向)



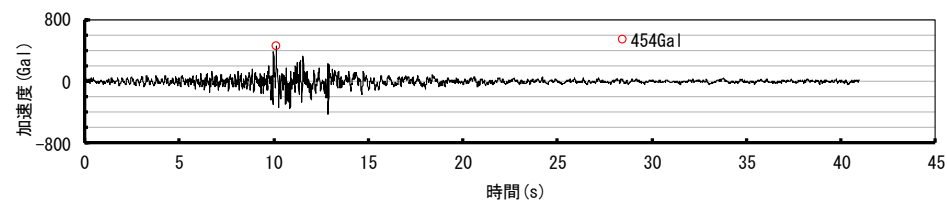
観測位相波__加速度時刻歴波形(水平方向)



乱数位相波__加速度時刻歴波形(鉛直方向)



観測位相波__加速度時刻歴波形(鉛直方向)



模擬地震波	最大加速度(Gal)
水平方向	693
鉛直方向	490

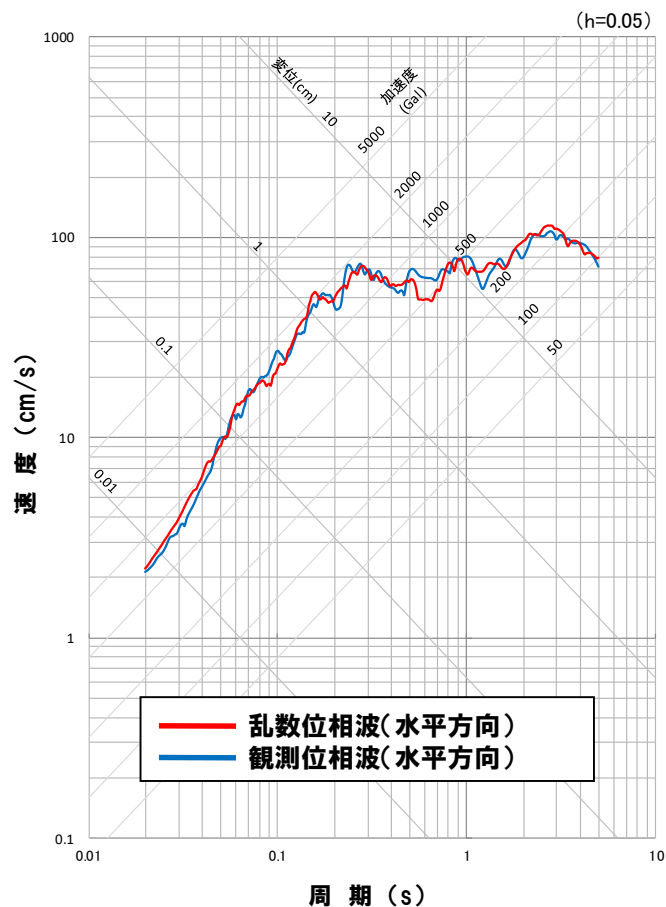
模擬地震波	最大加速度(Gal)
水平方向	674
鉛直方向	454

③ 解放基盤表面における地震動の設定

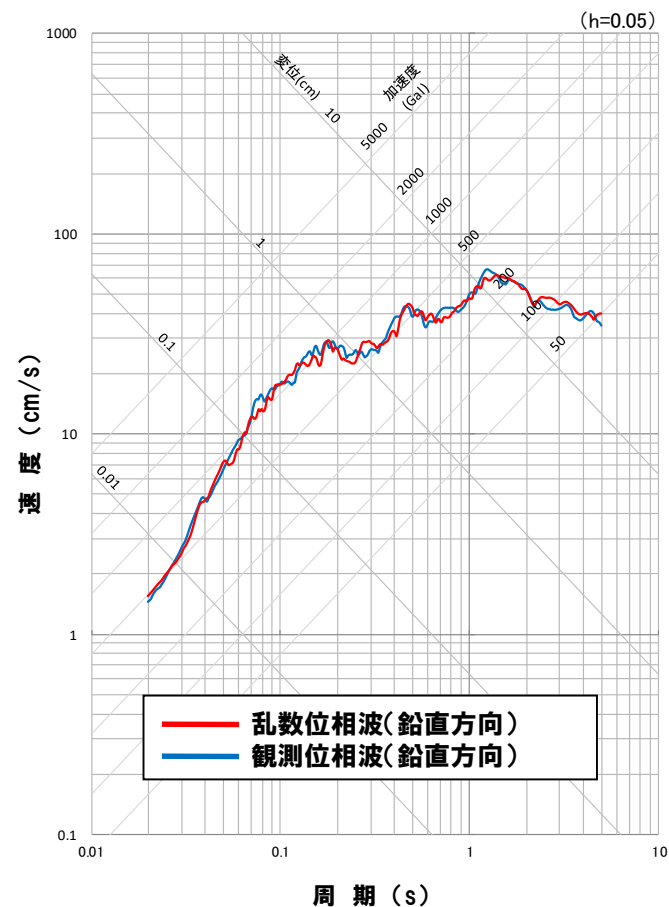
応答スペクトルの比較

○乱数位相を用いて作成した模擬地震波と観測位相を用いて作成した模擬地震波の解放基盤表面での応答スペクトルを比較した結果、乱数位相を用いて作成した模擬地震波と観測位相を用いて作成した模擬地震波は、同程度である。

応答スペクトル(水平方向)



応答スペクトル(鉛直方向)



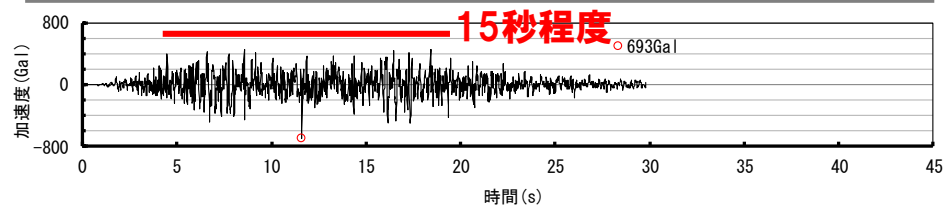
③ 解放基盤表面における地震動の設定

時刻歴波形の比較

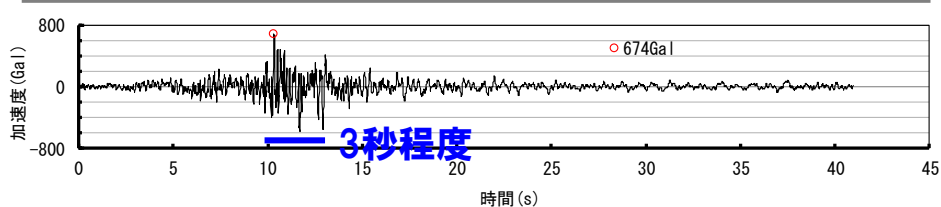
○時刻歴波形を比較すると、乱数位相の模擬地震波の方が水平方向、鉛直方向とも最大加速度が大きく、比較的振幅の大きい波(最大加速度値の0.5倍以上の振幅)の継続時間が長い。

- ・水平方向:乱数位相波が15秒程度, 観測位相波が3秒程度
- ・鉛直方向:乱数位相波が11秒程度, 観測位相波が3秒程度

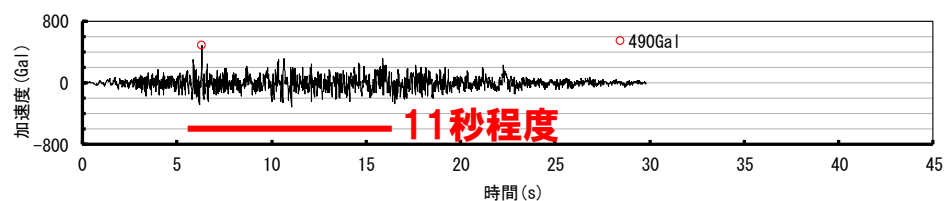
乱数位相波__加速度時刻歴波形(水平方向)



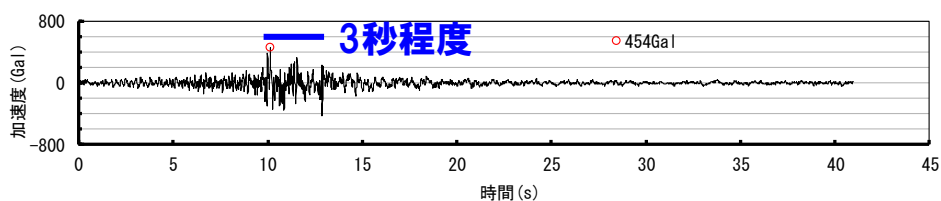
観測位相波__加速度時刻歴波形(水平方向)



乱数位相波__加速度時刻歴波形(鉛直方向)



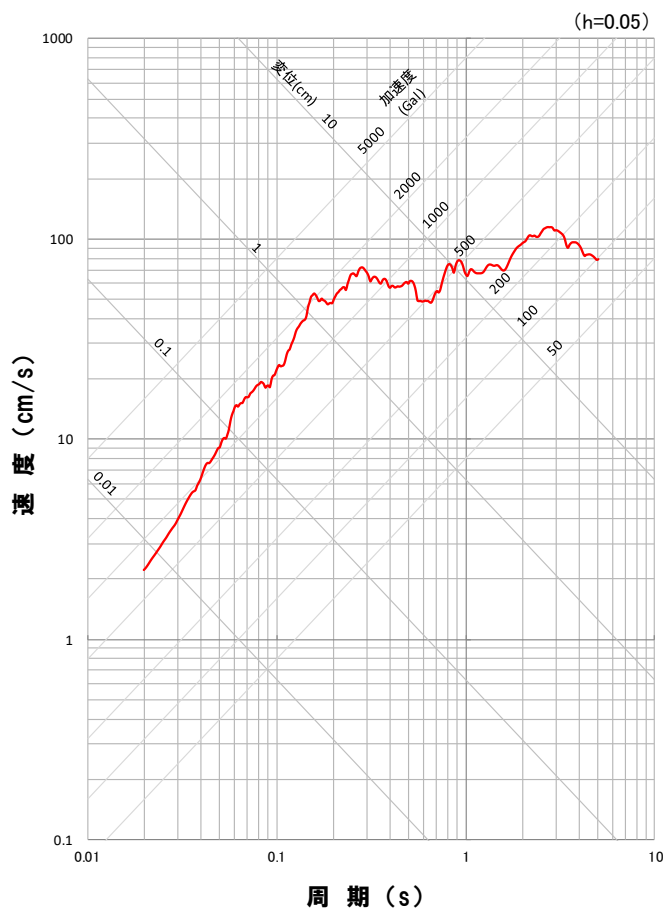
観測位相波__加速度時刻歴波形(鉛直方向)



③ 解放基盤表面における地震動の設定

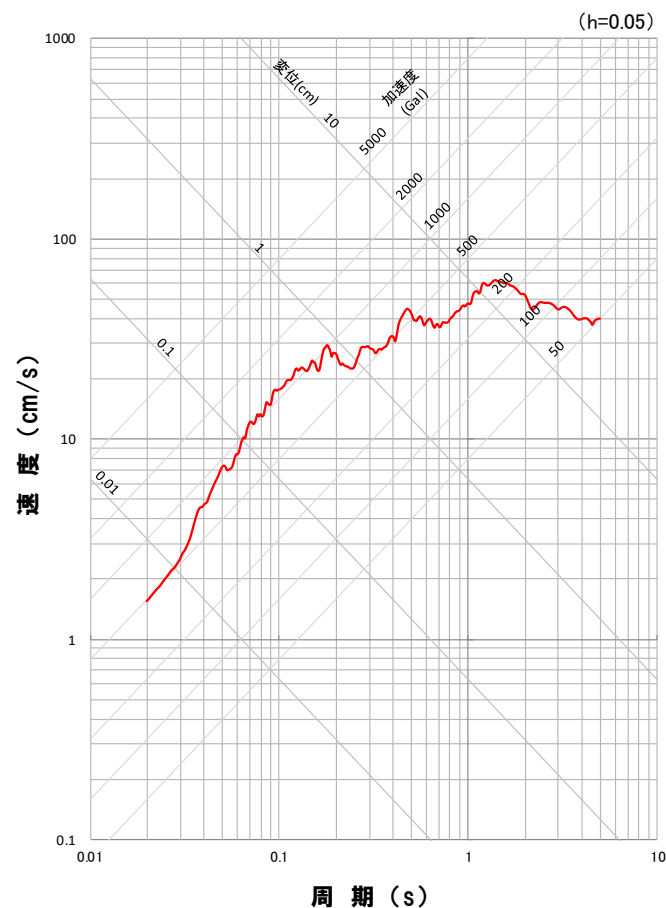
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価としては、以下を踏まえて、乱数位相を用いて作成した模擬地震波を採用する。
 - ・敷地周辺の観測点における観測記録を収集した結果、特異な形状の波形はないこと
 - ・乱数位相と観測位相の模擬地震波の解放基盤表面での応答スペクトルが同程度であること
 - ・乱数位相の模擬地震波の方が最大加速度が大きく、比較的振幅の大きい波の継続時間が長いこと
- 設定した解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を下記に示す。

応答スペクトル(水平方向)



— 標準応答スペクトルを考慮した地震動(水平方向)

応答スペクトル(鉛直方向)



— 標準応答スペクトルを考慮した地震動(鉛直方向)

④ まとめ

【模擬地震波の作成方針】

- 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を作成する。
- 作成に際しては、複数の手法として乱數位相を用いた手法、実観測記録の位相を用いた手法による検討を実施する。



【① 乱數位相を用いた模擬地震波の作成】

- 模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al.(2002)による振幅包絡線の経時的变化(M7.0, $X_{eq}=10\text{km}$)を採用し、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。

【② 観測位相を用いた模擬地震波の検討】

- 敷地において、標準応答スペクトルに適用できる地震観測記録は得られていないことから、他機関の記録を用いた検討を実施。
- 観測記録の収集は、震源特性に加え、伝播特性に着目し、可能な限り敷地近傍の記録を収集するため、敷地周辺のKiK-net観測点を対象に内陸地殻内地震の観測記録を収集。
- 収集した8つの観測記録については、特異な形状の波形がないことを確認。
- また、地震規模の大きい2014/7/8胆振地方の地震(M5.6)の記録のうち、観測点のS波速度が最も大きいSBSH08喜茂別の観測記録を用いて模擬地震波の検討を実施。



【③ 解放基盤表面における地震動の設定】

- 乱數位相を用いた模擬地震波および観測位相を用いた模擬地震波について、応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を比較。
 - ・乱數位相と観測位相の模擬地震波の解放基盤表面での応答スペクトルが同程度
 - ・乱數位相の模擬地震波の方が最大加速度が大きく、比較的振幅の大きい波の継続時間が長い
- 収集した観測記録に特異な形状の波形がないことを確認している(②観測位相を用いた模擬地震波の検討)。また、解放基盤表面における応答スペクトルおよび加速度時刻歴波形を比較した結果も踏まえ、比較的振幅の大きい波の継続時間が長く、最大加速度も大きい乱數位相を用いて作成した模擬地震波を標準応答スペクトルを考慮した地震動として採用する。

余白

4. 參考資料

4. 参考資料

4. 1	地震動評価に用いる地下構造モデルの設定	48
4. 2	既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証	60
4. 3	泊発電所から半径30km以内の観測点の地盤情報	66
4. 4	北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報	72
4. 5	地震動評価結果の比較	86

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地下構造モデルの設定方法(統計的グリーン関数法)

○敷地内・敷地周辺の調査結果・地震観測記録を活用して設定

○調査結果等がない場合, 他機関の地下構造モデル等に基づき設定

- ①標高 0m～ -250m : 地震観測点におけるボーリング調査・地震観測記録による同定解析
 ②標高 -250m～ -990m : 1号機原子炉建屋位置におけるボーリング調査
 ③標高 -990m～ -2000m : 弾性波探査・文献
 ④標高 -2000m～ : 他機関の地下構造モデル

標高 (m)	層厚 (m)		密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0～ -56	56	地震観測点 PS 検層結果	地震観測点 ボーリングデータ	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)		地震観測記録による 同定解析結果を基に 安全側に設定
-56～ -250	194					
-250～ -430	180	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	1号機原子炉建屋 ボーリングデータ	1号機原子炉建屋 PS 検層結果		標高-250m 以浅 の設定値を用いる
-430～ -990	560					
-990～ -2000	1010	弾性波 探査結果	$\rho = 0.31Vp^{1/4}$ 物理探査 ハンドブック (1999)	Vp と Vs の関係式 により設定 太田ほか(1985)	弾性波 探査結果	
-2000 ～	—	—	防災科学技術研究所(2005)			

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地下構造モデルの設定(標高0m～標高-250m)

○標高0m～-250mについては、以下の赤枠に示した方法により地盤モデルの諸元を設定している。次頁以降に設定に用いた検討結果を示す。

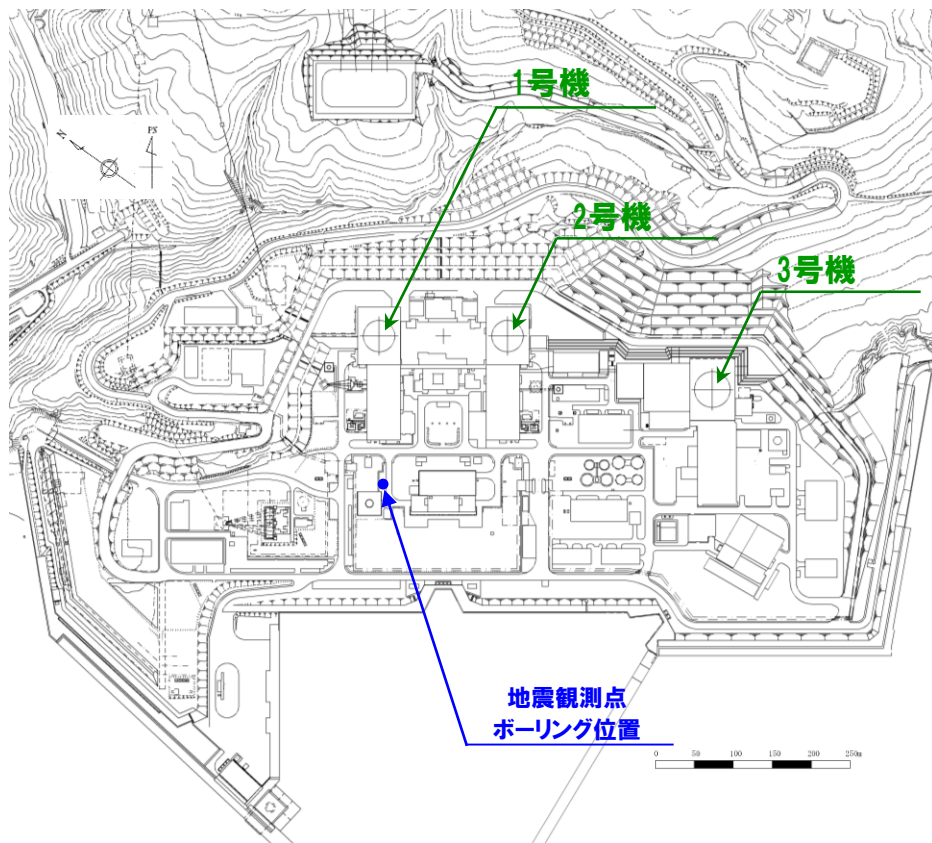
標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0～ -56	56	地震観測点 ボーリングデータ	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による同定解析結果を基に 安全側に設定
-56～ -250	194				
-250～ -430	180	1号機原子炉建屋 ボーリングデータ	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	標高-250m 以浅 の設定値を用いる
-430～ -990	560				
-990～ -2000	1010	$\rho = 0.31Vp^{1/4}$ 物理探査 ハンドブック (1999)	Vp と Vs の関係式 により設定 太田ほか(1985)	弾性波 探査結果	
-2000 ～	—	—	防災科学技術研究所(2005)		

4. 参考資料

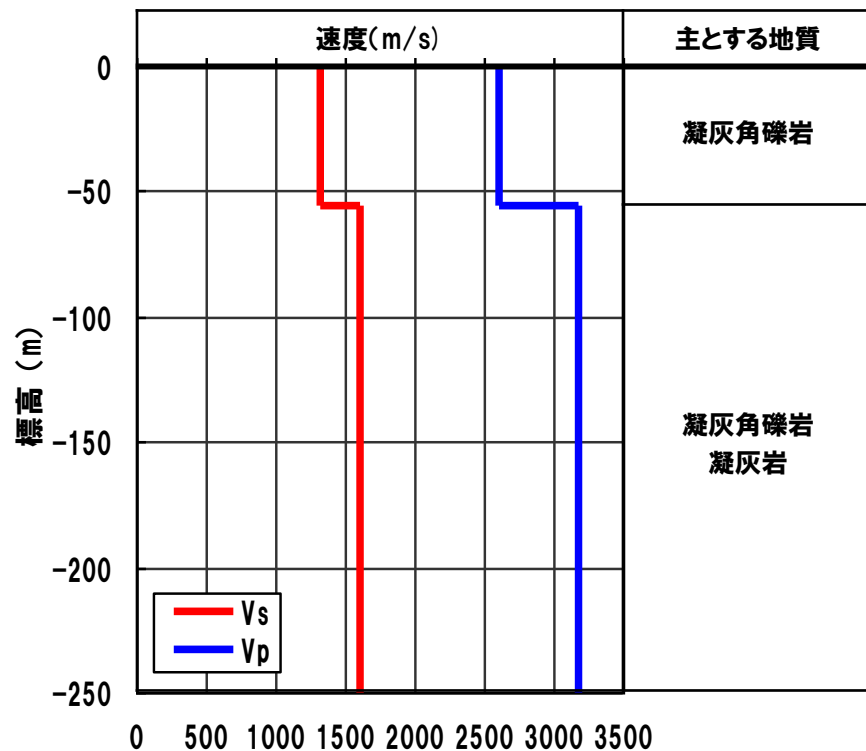
4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地震観測点PS検層結果



ボーリング位置図



地震観測点PS検層結果

4. 参考資料

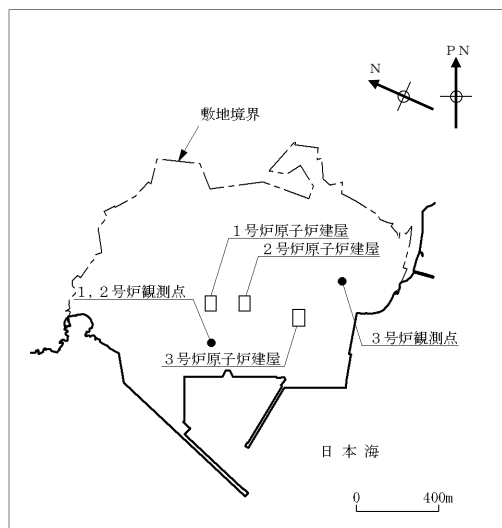
4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地震観測記録を用いた地盤の同定解析

○標高0m~-250mは地震観測記録を用いた同定解析により地下構造モデル(P波速度, S波速度)を設定[初期値はPS検層結果]

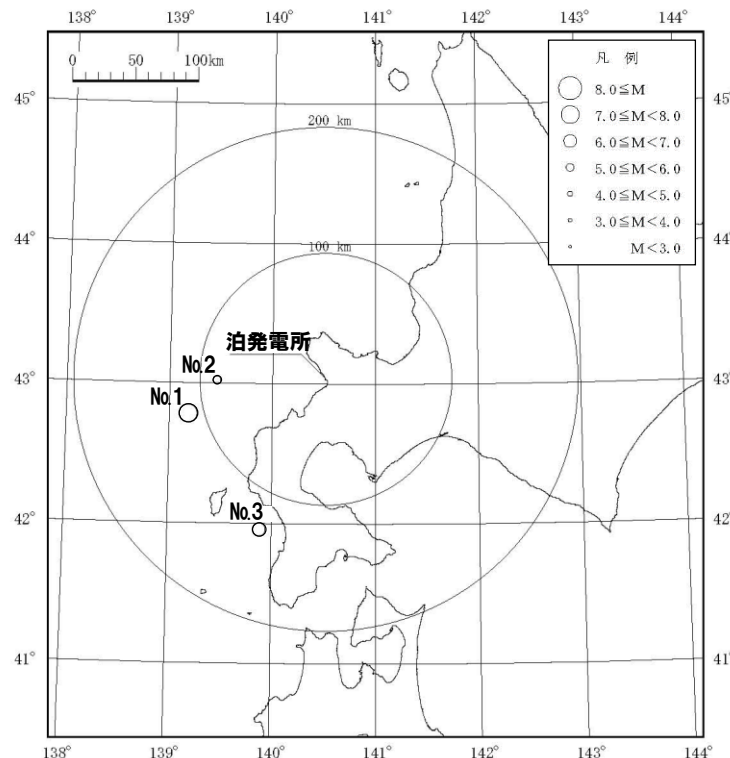
同定解析に用いた地震観測記録



配置図

標高(m)	1, 2号炉観測点	
	地震計	地層
+64		
+56		
+10		
+2.3	埋戻し土	
-90		
-250		神恵内層

地震計の設置レベル



No	発生年月日	震央位置		深さ(km)	マグニチュードM	震央距離(km)	地名(地震名)
		東経(°)	北緯(°)				
1	1993. 7.12	139.180°	42.782°	35	7.8	113	北海道南西沖 (1993年北海道南西沖地震)
2	1993. 7.12	139.457°	43.022°	35	5.4	86	北海道南西沖 (1993年北海道南西沖地震・余震)
3	1993. 8. 8	139.882°	41.958°	24	6.3	131	北海道南西沖 (1993年北海道南西沖地震・最大余震)

※ 1, 2号炉観測点で観測

※ 地震の諸元は気象庁地震カタログ

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地震観測記録を用いた地盤の同定解析

- 標高0m～-250mのP波速度, S波速度および減衰定数について, 地震観測記録の観測点間のフーリエ振幅スペクトル比に適合するように同定
- 解析手法は, 佐藤他(1994)による
- 密度はボーリングデータ, 層厚および層数はPS検層結果に基づき設定
- P波速度およびS波速度の初期値はPS検層結果に基づき設定
- 減衰定数は周波数依存型減衰

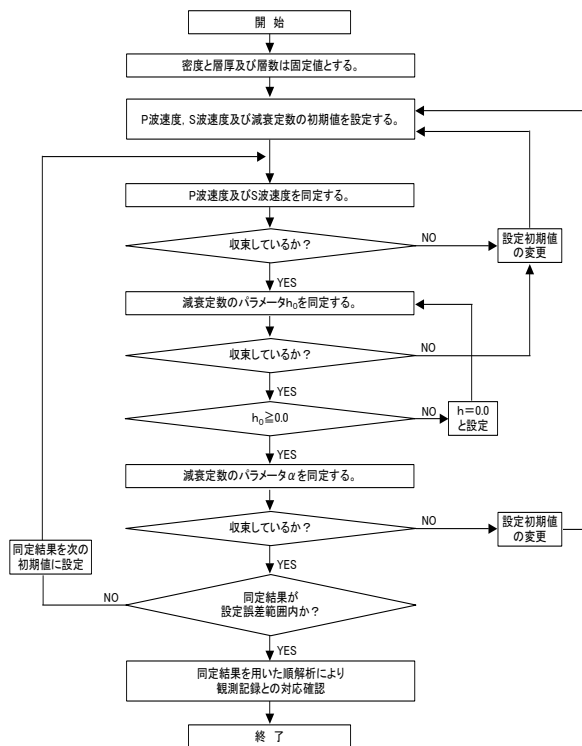
$$h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$$

f : 周波数

h₀ : 1Hzにおける減衰定数

α : 周波数依存の度合い

標高(m)	層厚(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	観測点
+10					○ 標高+10m
+2.3	10	480	1250	1.8	○ 標高+2.3m
±0.0					
	56	1320	2600	2.1	
-56					
					○ 標高-90m
-90					
	194	1600	3170	2.2	
-250					○ 標高-250m



標高(m)	層厚(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	観測点
+10					○ 標高+10m
+2.3	10	480	1250	1.8	○ 標高+2.3m
±0.0					
	56	1175	2660	2.1	
-56					
					○ 標高-90m
-90					
	194	1935	3230	2.2	
-250					○ 標高-250m

同定解析に用いた地盤モデル[初期値]

P波速度, S波速度および減衰定数の同定解析手順

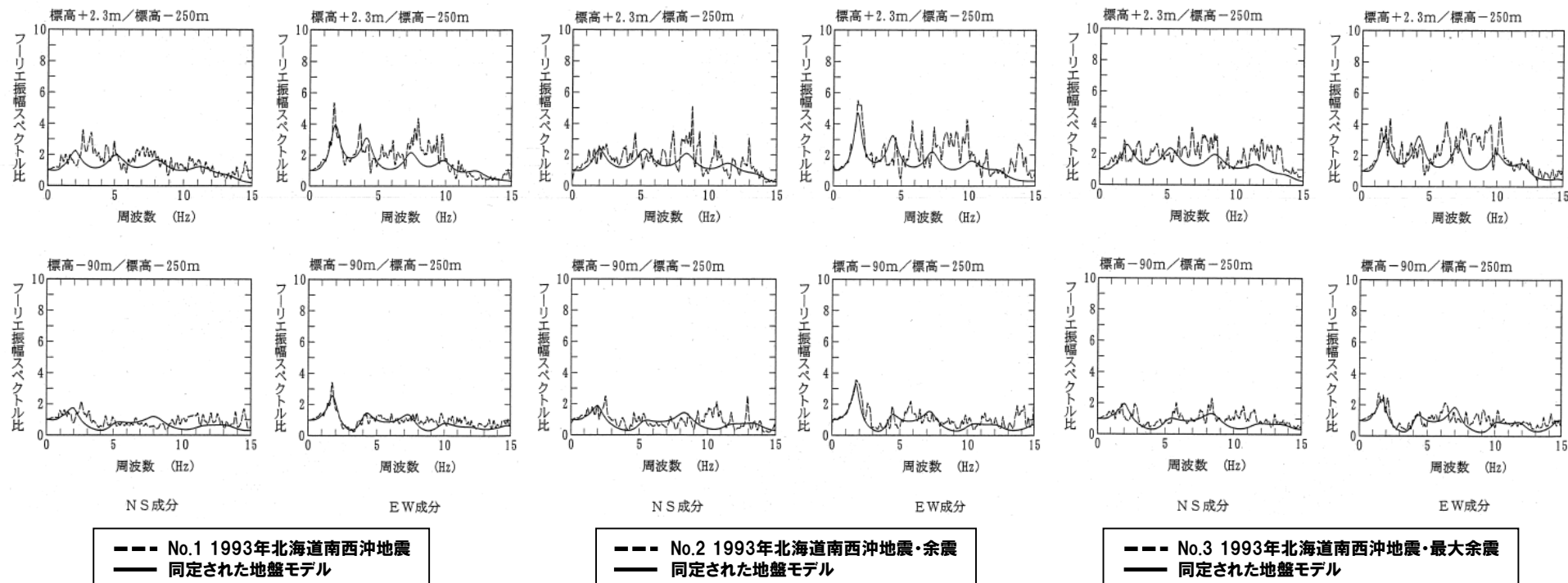
同定解析結果による地盤モデル

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地震観測記録を用いた地盤の同定解析(フーリエ振幅スペクトル比)



同定結果(No.1 1993年北海道南西沖地震)

同定結果(No.2 1993年北海道南西沖地震・余震)

同定結果(No.3 1993年北海道南西沖地震・最大余震)

○3地震について成分毎に同定された地盤モデルによるフーリエ振幅スペクトル比は、観測記録のフーリエ振幅比と傾向は対応している。

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

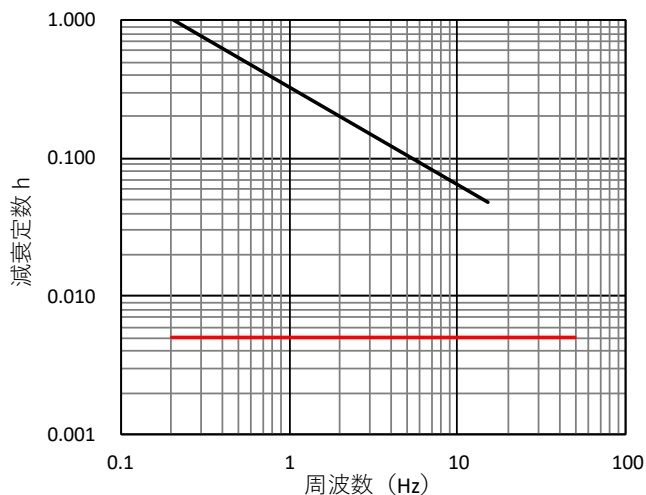
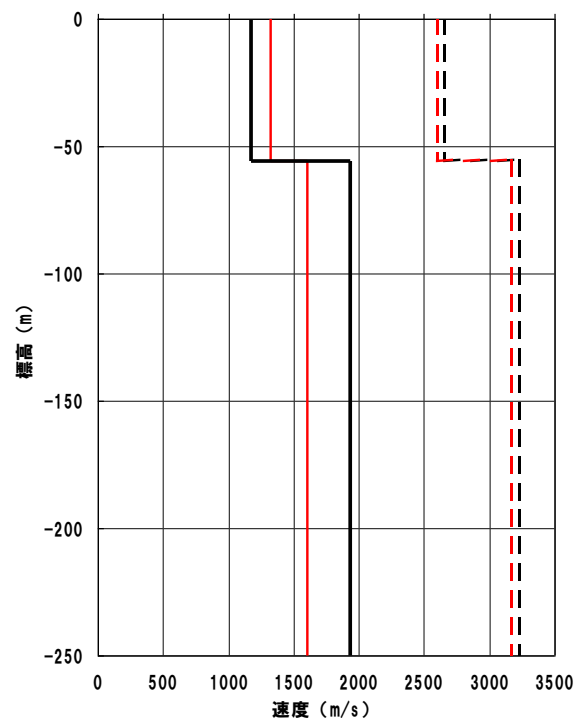
一部加筆修正 (R3.10.22審査会合資料)

地震観測記録を用いた地盤の同定解析

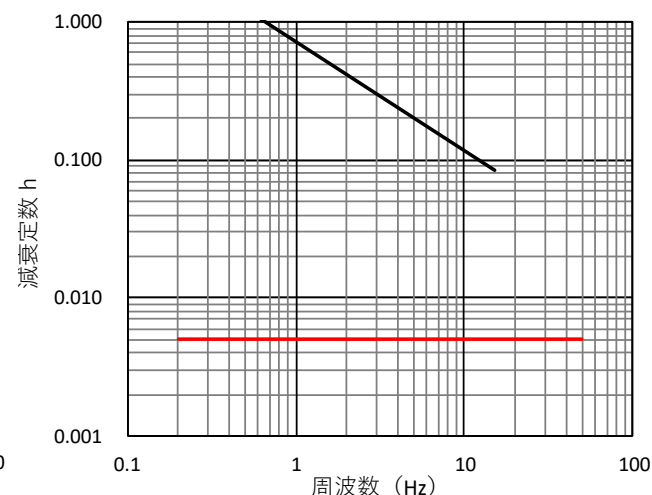
P波速度, S波速度

減衰定数h(水平)

減衰定数h(鉛直)



— 同定解析結果($h(f)=0.33 \times f^{-0.71}$)
 — Q値100($h=0.005$)



— 同定解析結果($h(f)=0.72 \times f^{-0.79}$)
 — Q値100($h=0.005$)

— 同定解析結果(S波速度)
 - - 同定解析結果(P波速度)
 — PS検層結果(S波速度)
 - - PS検層結果(P波速度)

- 同定解析によるP波速度・S波速度の傾向は、PS検層結果と概ね整合
- 同定解析によるP波速度・S波速度を用いて、標高-250m以浅の地下構造モデルを設定

- 同定解析により得られた減衰定数は大きめの値となっている
- 地下構造モデルの設定では、同定解析により得られた減衰定数を基に、地震動評価上安全側にQ値=100(減衰定数 $h=0.005$)としている

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地下構造モデルの設定方法(標高-250m～標高-990m)

○標高-250m～-990mについては、以下の赤枠に示した方法により地盤モデルの諸元を設定している。次頁以降に設定に用いた検討結果を示す。

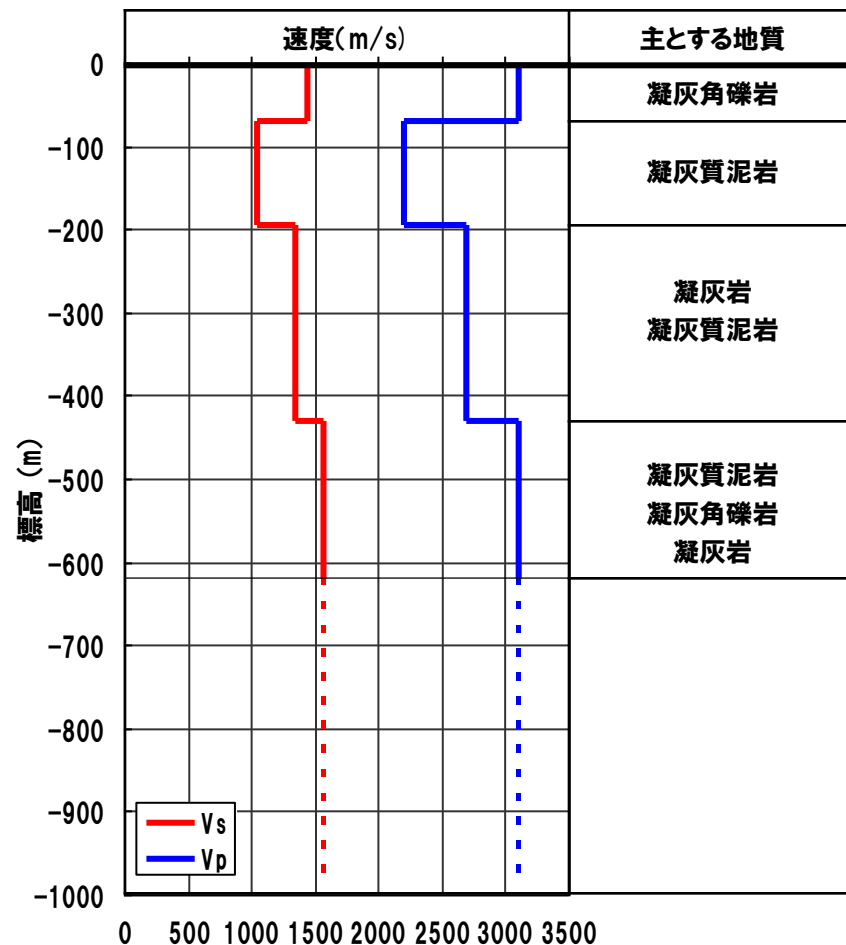
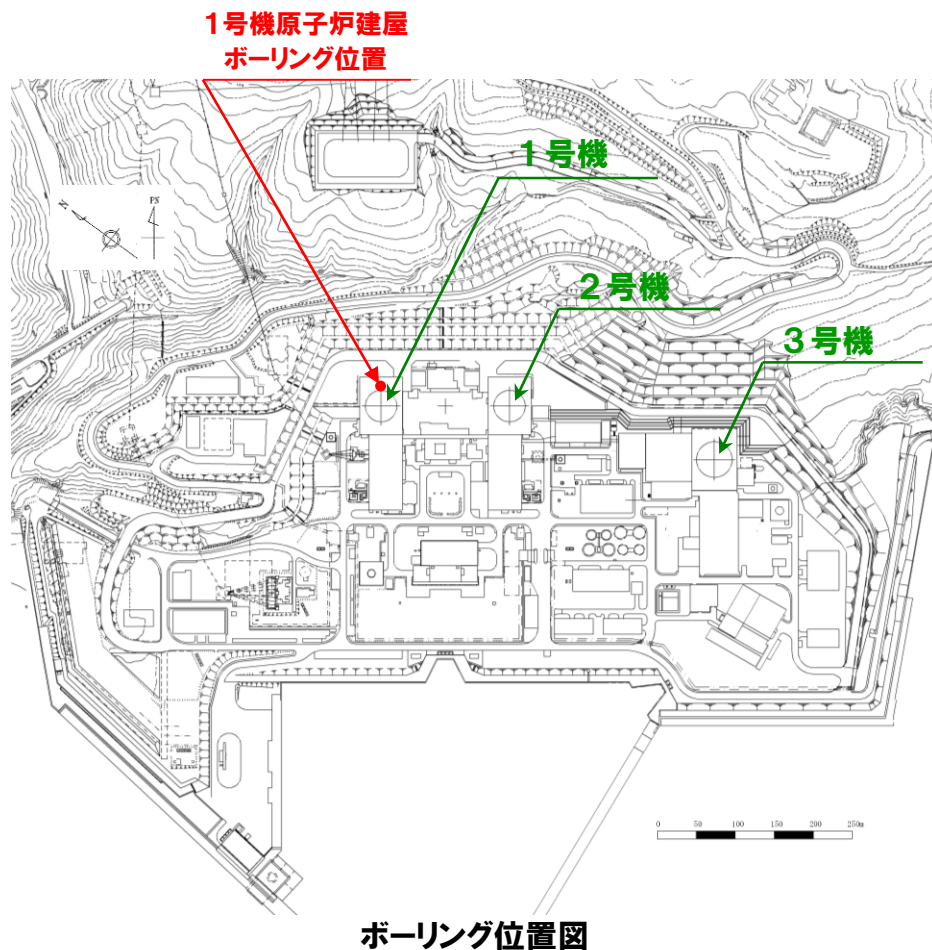
標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0～ -56	56	地震観測点 ボーリングデータ	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による 同定解析結果を基に 安全側に設定
-56～ -250	194				
-250～ -430	180	1号機原子炉建屋 ボーリングデータ	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	標高-250m 以浅 の設定値を用いる
-430～ -990	560				
-990～ -2000	1010	$\rho = 0.31V_p^{1/4}$ 物理探査 ハンドブック (1999)	Vp と Vs の関係式 により設定 太田ほか(1985)	弾性波 探査結果	標高-250m 以浅 の設定値を用いる
-2000 ～	—	—	防災科学技術研究所(2005)		

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

1号機原子炉建屋PS検層結果



○地下構造モデルの設定においては、PS検層結果の最下層(標高-430m~-620m)のP波速度3100m/sが弾性波探査によるP波速度3000m/s層(~標高-990m)と整合していることを確認し、標高-990mまで続くものとして設定している。

4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

地下構造モデルの設定方法(標高-990m～標高-2000m)

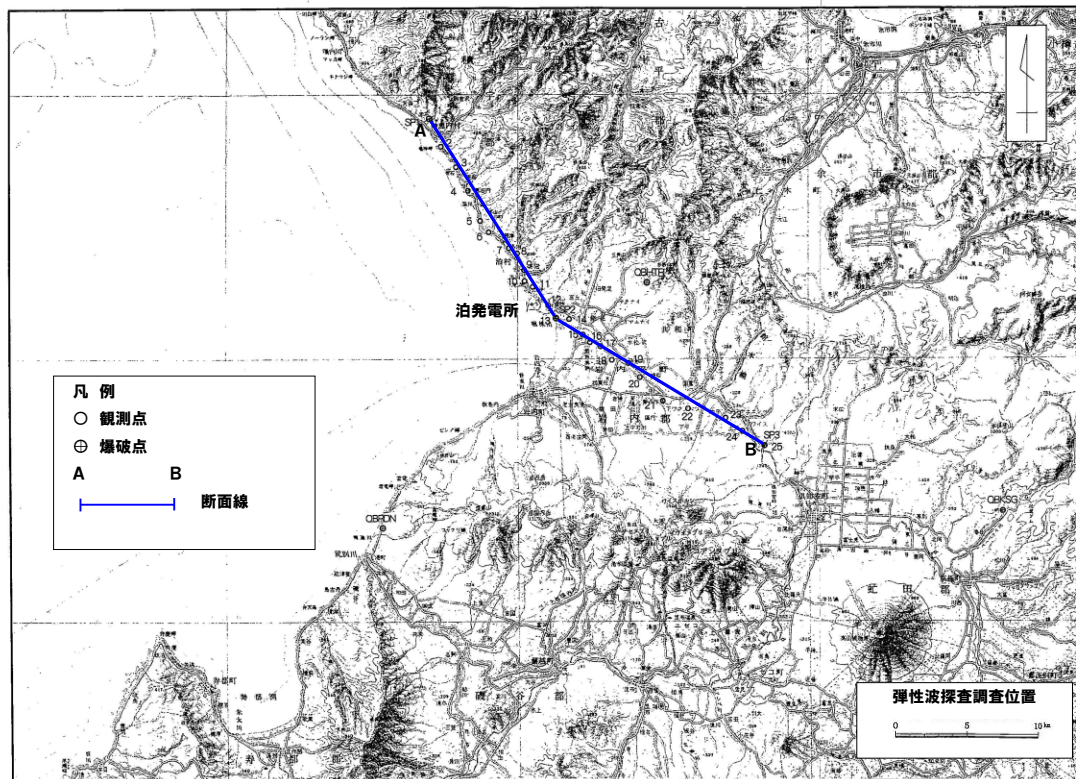
○標高-990m～-2000mについては、以下の赤枠に示した方法により地盤モデルの諸元を設定している。次頁以降に設定に用いた検討結果を示す。

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0～ -56	56	地震観測点 ボーリングデータ	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による同定解析結果 (初期値は PS 検層結果)	地震観測記録による 同定解析結果を基に 安全側に設定
-56～ -250	194				
-250～ -430	180	1号機原子炉建屋 ボーリングデータ	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	1号機原子炉建屋 PS 検層結果	標高-250m 以浅 の設定を用いる
-430～ -990	560				
-990～ -2000	1010	$\rho = 0.31Vp^{1/4}$ 物理探査 ハンドブック (1999)	Vp と Vs の関係式 により設定 太田ほか(1985)	弾性波 探査結果	標高-250m 以浅 の設定を用いる
-2000 ～	—	—	防災科学技術研究所(2005)		

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

再掲 (R3.10.22審査会合資料)

敷地周辺で実施した弾性波探査結果

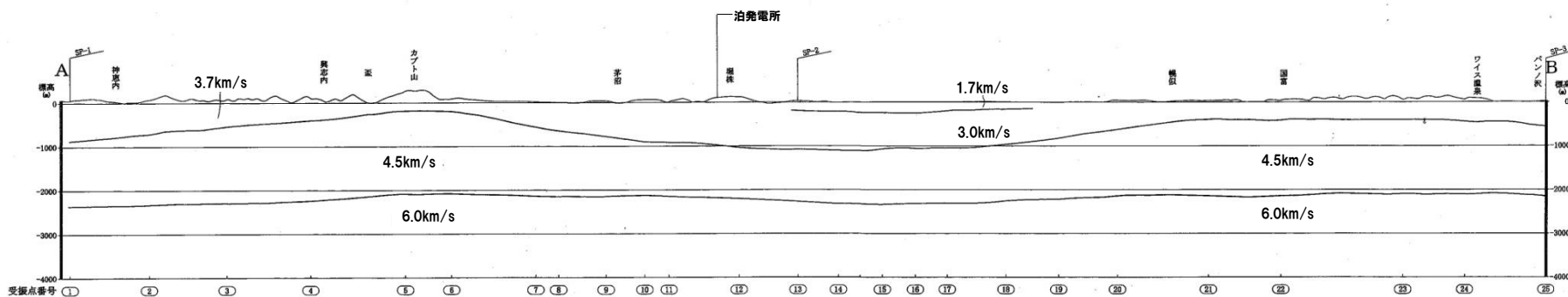


測線長 : 約33km

観測点数 : 25点

観測点間隔 : 中央部約1km, 周辺部約2km

○ 標高-2200mで地震基盤とみなせるP波速度6.0km/sの層がみられるものの、後段で示す地震発生層の検討結果を踏まえて、標高-2000mを地震基盤と設定する。



4. 参考資料

4.1 地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

一部加筆修正 (R3.10.22審査会合資料)

統計的グリーン関数法に用いた地下構造モデル

○PS検層結果, 弾性波探査結果等を基に, 敷地の地震観測記録に基づき設定

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q値	
0~-56	56	2.1	1175	2660	100	◁解放基盤表面
-56~-250	194	2.2	1935	3230	100	
-250~-430	180	1.9	1350	2700	100	
-430~-990	560	1.9	1560	3100	100	
-990~-2000 ^{※1}	1010	2.5	2400	4500	100	◁地震基盤
-2000 ^{※1} ~	—	2.8 ^{※2}	3500 ^{※2}	6400 ^{※2}	150 ^{※2}	

※1 弾性波探査結果から標高-2200mが地震基盤(地震発生層上端)と考えられるが, 安全側に-2000mに設定

※2 -2000m以深の物性値については(独)防災科学技術研究所(2005)による

4. 参考資料

4.2 既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

一部加筆修正 (R4.1.14審査会合資料)

既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

- 既往の地下構造モデルに対して、以下の検討を行う。
- 既往の地下構造モデルにおける減衰定数の設定は、日本海東縁部で発生した1993年北海道南西沖地震および余震の3地震の地震観測記録のみを用いて同定解析(以下、既往の同定解析という。)を実施していることを踏まえ、同定解析結果に余裕を考慮して、地震動評価上、大きいQ値(小さい減衰定数)を設定している。
- 一方で、泊発電所では、更なる安全性・信頼性の向上を目的に、継続的に敷地地盤における地震観測を実施し、観測データの取得に努めてきており、2018年に発生した平成30年北海道胆振東部地震について、敷地で比較的大きな観測記録が得られている。
- 以上を踏まえ、新たに得られた平成30年北海道胆振東部地震を含めた地震観測記録を用いて、改めて同定解析を行い、既往の地下構造モデルの減衰定数の検証を行う。
- なお、標高-250m以浅で地震観測記録が得られていることを踏まえ、標高-250m以浅について、改めて評価を行う。

① 北海道胆振東部地震を含めた地震観測記録を用いて、改めて地盤同定を実施



② 改めて実施した同定解析結果と既往の同定解析結果との比較検討を実施



③ 比較検討結果を踏まえ、地下構造モデルのQ値(減衰定数)を検証

標高 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	S波速度 Vs (m/s)	P波速度 Vp (m/s)	Q値
0~-56	56	2.1	1175	2660	100
-56~-250	194	2.2	1935	3230	100
-250~-430	180	1.9	1350	2700	100
-430~-990	560	1.9	1560	3100	100
-990~-2000	1010	2.5	2400	4500	100
-2000~	-	2.8	3500	6400	150

◁ 解放基盤表面

➡ 地下構造モデルの検証
(Q値(減衰定数)の検証)

◁ 地震基盤

既往の地下構造モデル

4. 参考資料

4.2 既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

再掲 (R4.1.14審査会合資料)

泊発電所における観測記録一覧

No.	地名または地震名	年月日	震央位置		震源深さ (km)	M	震央距離 (km)	最大加速度(Gal) 1.2号炉観測点 (標高+2.3m)	
			北緯	東経				NS	EW
1	1993年釧路沖地震	1993/01/15 20:06:07	42.920	144.353	101	7.5	313	11	5
2	1993年北海道南西沖地震	1993/07/12 22:17:11	42.782	139.180	35	7.8	113	49	54
3	積丹半島北西沖	1993/07/12 23:01:49	43.135	139.533	37	4.7	81	1	2
4	積丹半島北西沖	1993/07/12 23:04:24	43.022	139.457	35	5.4	86	5	11
5	北海道南西沖	1993/07/13 03:10:55	42.665	139.245	22	4.7	112	1	1
6	北海道南西沖	1993/07/13 03:17:20	42.930	139.360	32	4.8	95	1	1
7	北海道南西沖	1993/07/13 03:25:56	42.887	139.232	20	4.8	106	2	2
8	北海道南西沖	1993/07/13 04:50:06	42.838	139.310	0	4.3	101	1	1
9	積丹半島北西沖	1993/07/13 05:54:40	43.093	139.327	6	4.5	97	1	1
10	北海道南西沖	1993/07/13 06:46:52	42.692	139.320	26	4.4	105	1	1
11	積丹半島北西沖	1993/07/13 07:34:15	43.012	139.517	28	4.1	81	1	2
12	北海道南西沖	1993/07/13 10:16:49	42.872	139.475	1	4.4	87	1	1
13	北海道南西沖	1993/07/13 14:32:52	42.613	139.240	24	4.2	114	1	1
14	北海道南西沖	1993/07/13 16:48:53	41.958	139.375	30	3.8	152	0.2	0.2
15	北海道南西沖	1993/07/13 21:36:25	42.683	139.412	0	5.2	98	3	5
16	北海道南西沖	1993/07/14 00:25:18	42.865	139.223	29	4.7	107	1	2
17	北海道南西沖	1993/07/14 17:18:27	42.933	139.300	32	4.4	100	1	1
18	積丹半島北西沖	1993/07/14 17:21:41	43.048	139.287	22	3.9	100	1	1
19	積丹半島北西沖	1993/07/15 02:34:17	43.055	139.323	31	3.7	97	1	1
20	北海道南西沖	1993/07/15 11:01:26	42.430	139.308	29	4.7	119	1	1
21	積丹半島北西沖	1993/07/15 11:47:29	43.082	139.263	32	4.3	102	2	4
22	積丹半島北西沖	1993/07/15 12:12:42	43.262	139.380	31	5.0	95	1	1
23	積丹半島北西沖	1993/07/16 04:36:10	43.238	139.355	36	4.3	97	1	1
24	北海道南西沖	1993/07/16 04:37:36	42.647	139.128	16	5.3	121	1	1
25	積丹半島北西沖	1993/07/16 21:55:02	43.008	139.405	38	3.8	90	2	4
26	北海道南西沖	1993/07/24 02:22:40	42.990	139.278	27	3.6	101	1	1
27	北海道南西沖	1993/07/25 03:46:54	42.498	139.330	35	4.6	114	1	1
28	1993年北海道南西沖地震最大余震	1993/08/08 04:42:43	41.958	139.882	24	6.3	131	7	5
29	1994年北海道東方沖地震	1994/10/04 22:22:56	43.375	147.673	28	8.2	583	4	5
30	1999年積丹半島北西沖	1999/03/15 18:44:54	43.416	139.177	28	4.5	116	2	1
31	根室半島沖	2000/01/28 23:21:08	43.008	146.744	59	7.0	508	2	1
32	青森県東方沖	2001/08/14 05:11:24	40.996	142.437	38	6.4	277	1	1
33	宮城県沖	2003/05/26 18:24:33	38.821	141.651	72	7.1	478	1	1
34	2003年十勝沖地震	2003/09/26 04:50:07	41.779	144.079	45	8.0	325	7	8
35	十勝沖	2003/09/26 06:08:01	41.710	143.692	21	7.1	300	3	3
36	十勝支庁南部	2004/06/11 03:12:10	42.322	143.131	48	5.2	229	1	1
37	釧路沖	2004/11/29 03:32:14	42.946	145.276	48	7.1	388	-	-
38	根室半島南東沖	2004/12/06 23:15:11	42.848	145.343	46	6.9	395	-	-
39	留萌支庁南部	2004/12/14 14:56:10	44.077	141.700	9	6.1	150	1	2
40	釧路沖	2005/01/18 23:09:06	42.876	145.007	50	6.4	367	1	1
41	宮城県沖	2005/08/16 11:46:25	38.150	142.278	42	7.2	563	1	1
42	北海道西方沖	2005/12/13 06:01:37	43.209	139.414	29	5.5	91	-	-
43	北海道南西沖	2010/03/30 10:02:51	43.192	138.578	25	5.8	158	2	3
44	東北地方太平洋沖地震	2011/03/11 14:46:18	38.104	142.861	24	9.0	583	3	2
45	岩手県沖	2011/03/11 15:06:10	39.045	142.398	29	6.5	471	1	1
46	岩手県沖地震	2011/06/23 06:50:50	39.948	142.591	36	6.9	384	1	1
47	宮城県沖	2011/04/07 23:32:43	38.204	141.920	66	7.2	550	-	-
48	三陸沖	2011/07/10 09:57:07	38.032	143.507	34	7.3	611	0.4	0.3
49	十勝地方南部	2012/08/25 23:16:17	42.328	143.111	49	6.1	227	1	1
50	三陸沖	2012/12/07 17:18:30	38.020	143.867	49	7.3	625	-	-
51	十勝地方南部	2013/02/02 23:17:36	42.702	143.227	102	6.5	225	1	1
52	胆振地方中東部	2014/07/08 18:05:24	42.648	141.267	3	5.6	75	2	2
53	浦河沖	2016/01/14 12:25:33	41.970	142.800	52	6.7	222	1	2
54	内浦湾	2016/06/16 14:21:28	41.948	140.987	11	5.3	127	-	-
55	北海道西方沖	2016/12/08 19:58:55	43.543	140.720	11	4.5	59	-	-
56	平成30年北海道胆振東部地震	2018/09/06 03:07:59	42.690	142.007	37	6.7	128	7	7
57	胆振地方中東部	2018/09/06 03:20:11	42.578	141.942	31	5.5	127	-	-
58	胆振地方中東部	2018/09/06 06:11:30	42.682	142.012	36	5.4	129	-	-
59	日高地方西部	2018/09/30 17:54:04	42.548	141.988	37	4.9	132	-	-
60	北海道南西沖	2018/11/12 10:44:52	42.810	139.223	33	4.4	108	1	2
61	胆振地方中東部	2019/02/21 21:22:40	42.765	142.003	33	5.8	125	1	2
62	十勝地方南部	2019/04/28 02:24:47	42.560	142.878	102	5.6	201	1	1
63	胆振地方中東部	2021/01/27 14:06:52	42.710	142.020	128	5.4	128	-	-
64	福島県沖	2021/02/13 23:07:51	37.728	141.698	55	7.3	598	-	-

- 地盤同定解析に用いる検討対象地震については、泊発電所で観測された左記の地震を対象とする。
- 左記の地震のうち、適切な伝達関数を評価するため、震央距離200km以内の地震、かつ、泊発電所における標高+2.3m観測点の最大加速度5Gal以上の記録を選定する。

泊発電所において観測された地震
(1993年1月～2021年2月:64地震)



震央距離200km以内の地震
かつ
最大加速度5Gal以上の記録を選定



地盤同定解析に用いる検討対象地震

1993年北海道南西沖地震
積丹半島北西沖
(1993年北海道南西沖地震・余震)
1993年北海道南西沖地震・最大余震
平成30年北海道胆振東部地震

4. 参考資料

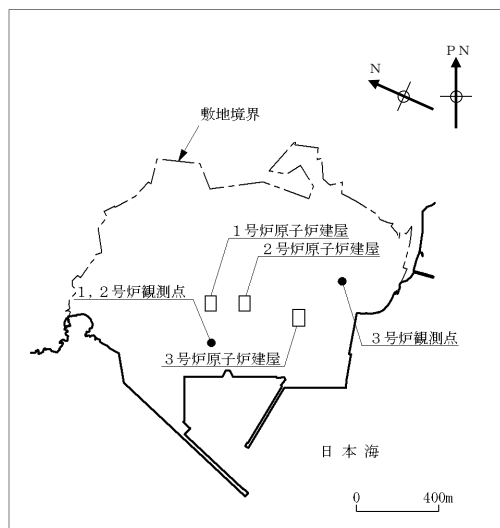
4.2 既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

再掲 (R4.1.14審査会合資料)

地震観測記録を用いた減衰定数の同定解析

○標高0m~-250mの減衰定数は平成30年北海道胆振東部地震を含めた4つの地震観測記録を用いた同定解析により設定。

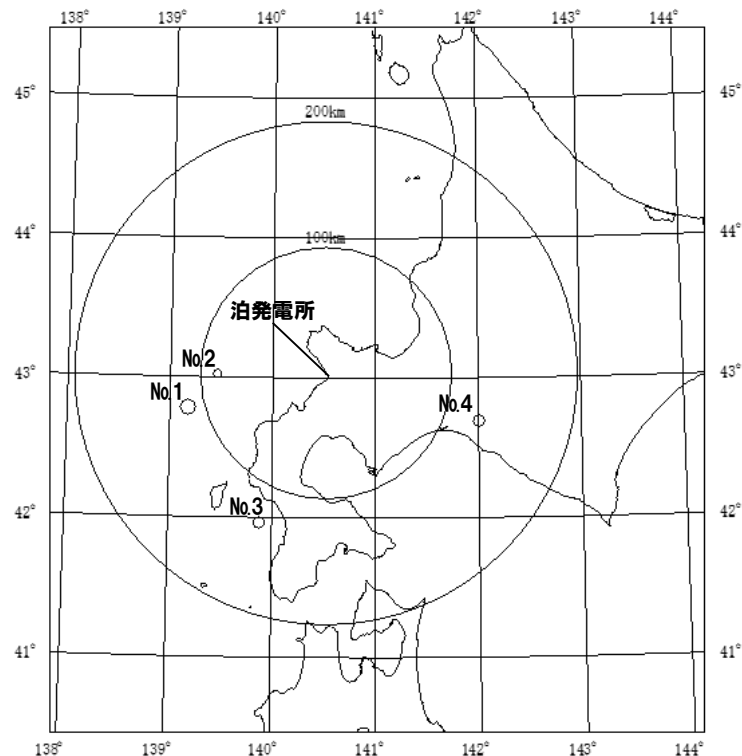
同定解析に用いた地震観測記録



配置図



地震計の設置レベル



No	発生年月日	震央位置		深さ(km)	マグニチュードM	震央距離(km)	地名(地震名)
		東経(°)	北緯(°)				
1	1993. 7. 12	139.180°	42.782°	35	7.8	113	北海道南西沖 (1993年北海道南西沖地震)
2	1993. 7. 12	139.457°	43.022°	35	5.4	86	積丹半島北西沖 (1993年北海道南西沖地震・余震)
3	1993. 8. 8	139.882°	41.958°	24	6.3	131	北海道南西沖 (1993年北海道南西沖地震・最大余震)
4	2018.9.6	142.007°	42.690°	37	6.7	128	胆振地方中東部 (平成30年北海道胆振東部地震)

※ 1, 2号炉観測点で観測
※ 地震の諸元は気象庁地震カタログ

4. 参考資料

4.2 既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

再掲 (R4.1.14審査会合資料)

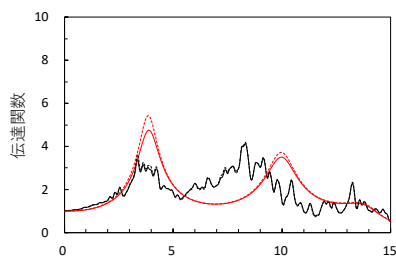
地震観測記録を用いた減衰定数の同定解析

- 標高0m~-250mの減衰定数について、地震観測記録の観測点間の伝達関数に適合するように同定。
- 密度はボーリングデータ、層厚および層数はPS検層結果に基づき設定。
- P波速度およびS波速度は、既往の地盤モデルの値で固定。
- 減衰定数は周波数依存型減衰とする。

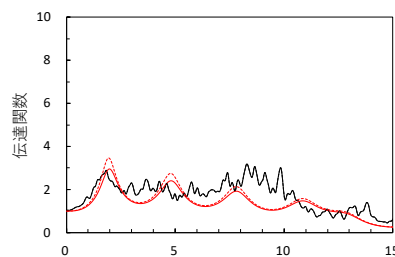
$$h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$$

f : 周波数
 h_0 : 1Hzにおける減衰定数
 α : 周波数依存の度合い

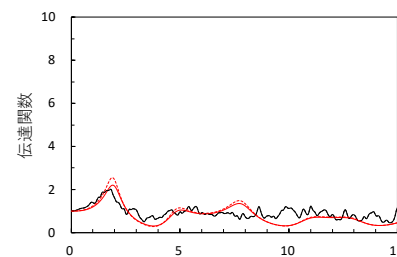
伝達関数



標高+2.3m/標高-90m



標高+2.3m/標高-250m

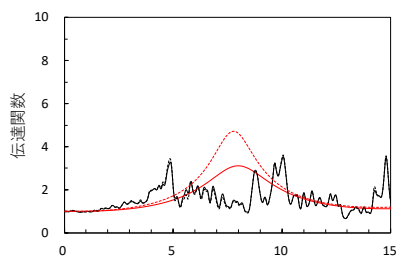


標高-90m/標高-250m

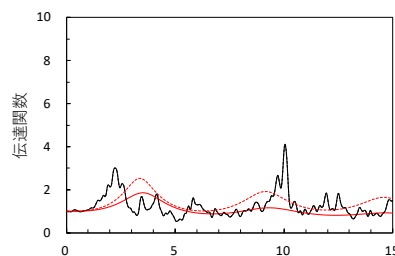
— 観測記録
 — 同定結果

※点線は、既往結果

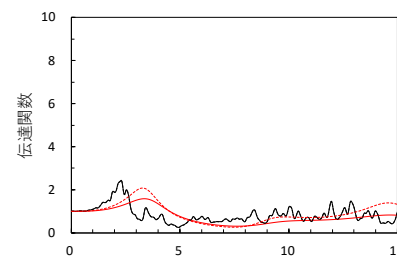
水平方向



標高+2.3m/標高-90m



標高+2.3m/標高-250m



標高-90m/標高-250m

— 観測記録
 — 同定結果

※点線は、既往結果

鉛直方向

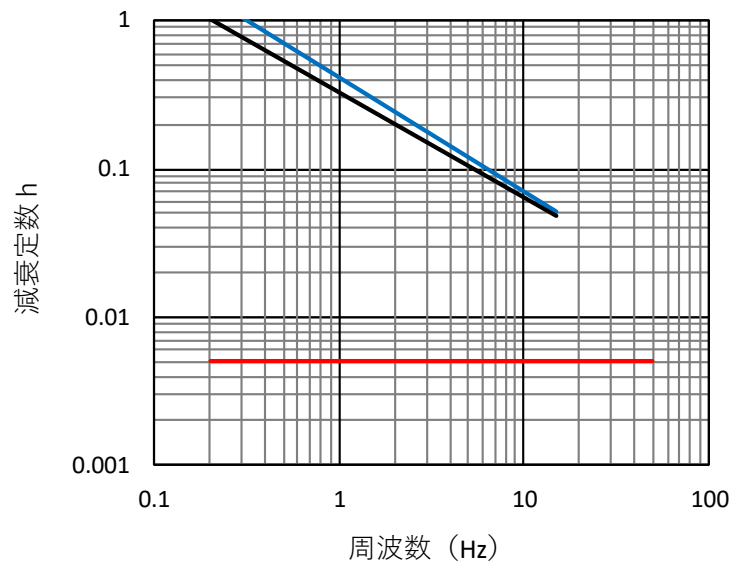
- 同定された地盤モデルによる伝達関数は、観測記録の伝達関数と傾向が概ね整合している。

4. 参考資料

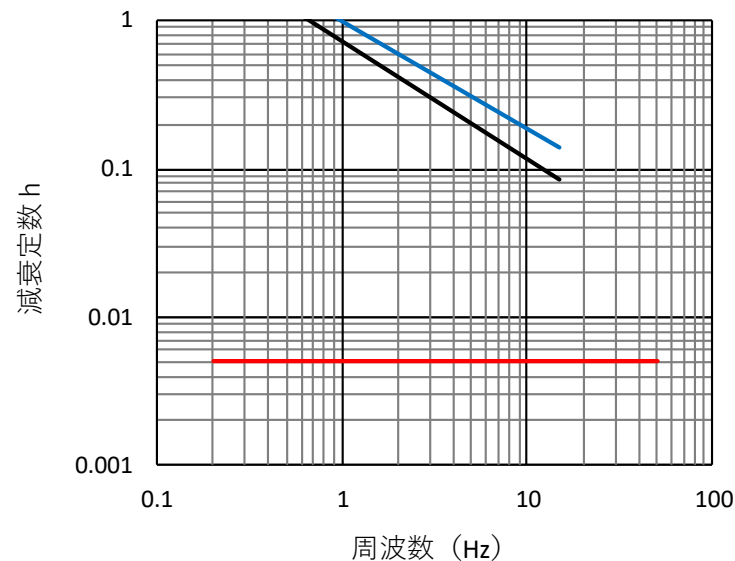
4.2 既往の地下構造モデルの減衰定数に関する検証

一部加筆修正 (R4.1.14審査会合資料)

地震観測記録を用いた減衰定数の同定解析

減衰定数 h (水平)

— 同定解析結果($h(f)=0.42 \times f^{-0.77}$)
 — 既往同定解析結果($h(f)=0.33 \times f^{-0.71}$)
 — Q値100($h=0.005$)

減衰定数 h (鉛直)

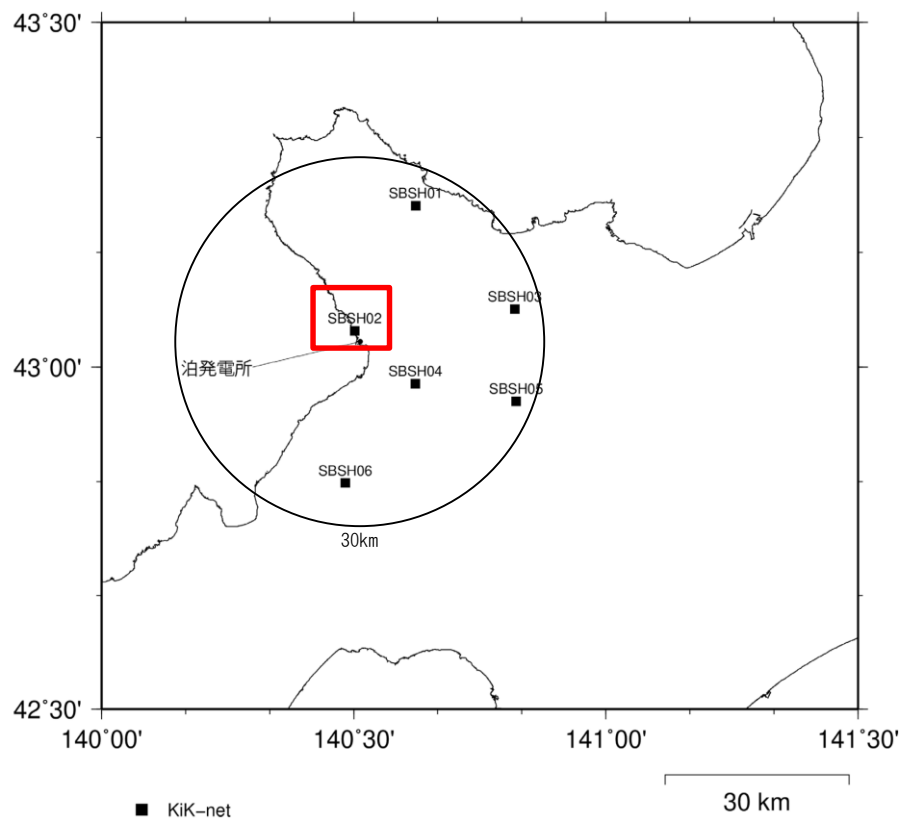
— 同定解析結果($h(f)=1.00 \times f^{-0.72}$)
 — 既往同定解析結果($h(f)=0.72 \times f^{-0.79}$)
 — Q値100($h=0.005$)

- 平成30年北海道胆振東部地震の観測記録を含めた地震観測記録を用いて同定解析を行った結果、既往の同定解析と概ね同等の結果が得られたことから、観測記録を追加することで評価結果の信頼性が向上していると考えられるとともに、既往の同定解析においても、地盤の減衰特性は、評価できているものと考えられる。
- また、平成30年北海道胆振東部地震の観測記録を踏まえた同定解析結果および既往の同定解析結果ともに解析対象周波数の15Hz以下において、減衰定数4%以上が得られていることから、既往の地下構造モデルで設定した減衰定数0.5%は、大きな裕度を持った設定となっていると考えられる。

余白

4. 参考資料

4.3 泊発電所から半径30km以内の観測点の地盤情報(KiK-net泊)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：泊(とまり)

所在地：北海道古宇郡泊村大字茅沼村南坂の上7-3

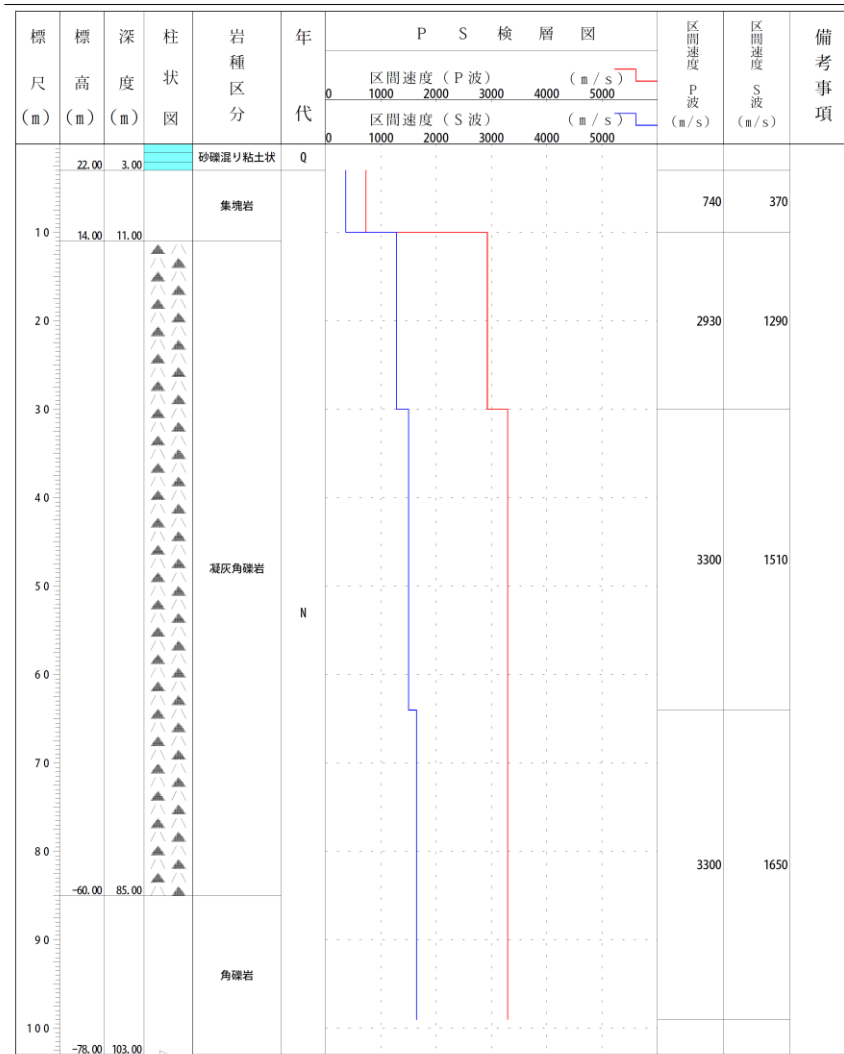
緯度：43° 3' 1"

孔口標高：+25m

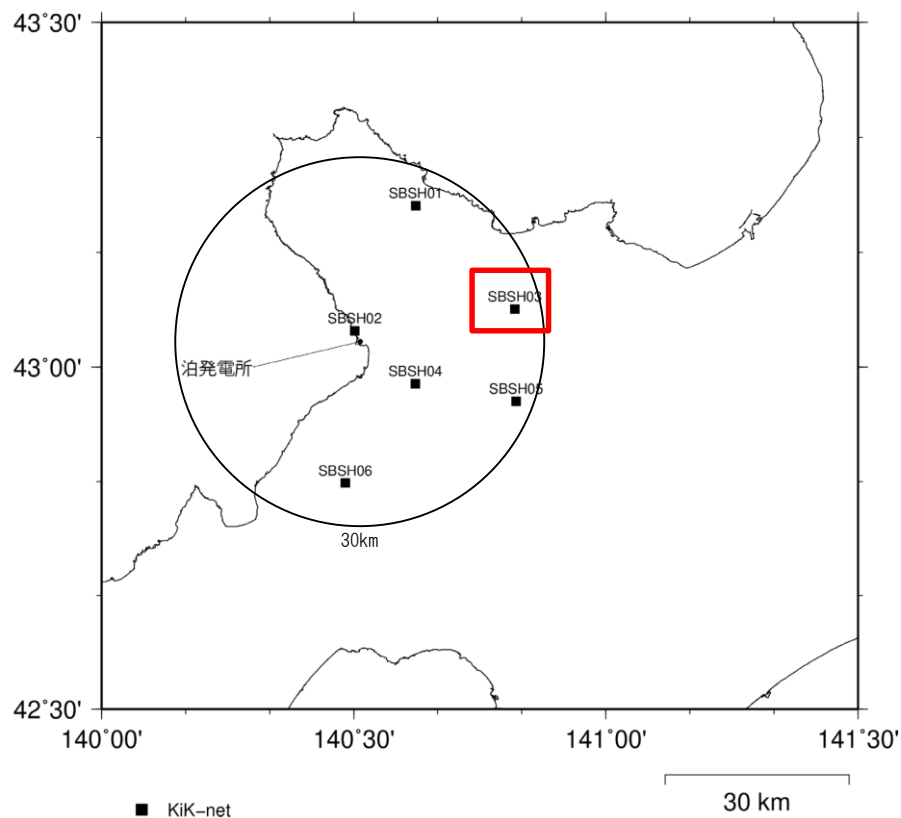
観測点コード：SBSH02

経度：140° 30' 19"

総掘進長：103.00m



4.3 泊発電所から半径30km以内の観測点の地盤情報(KiK-net赤井川)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名: 赤井川(あかいがわ)

所在地: 北海道余市郡赤井川村字赤井川123番地

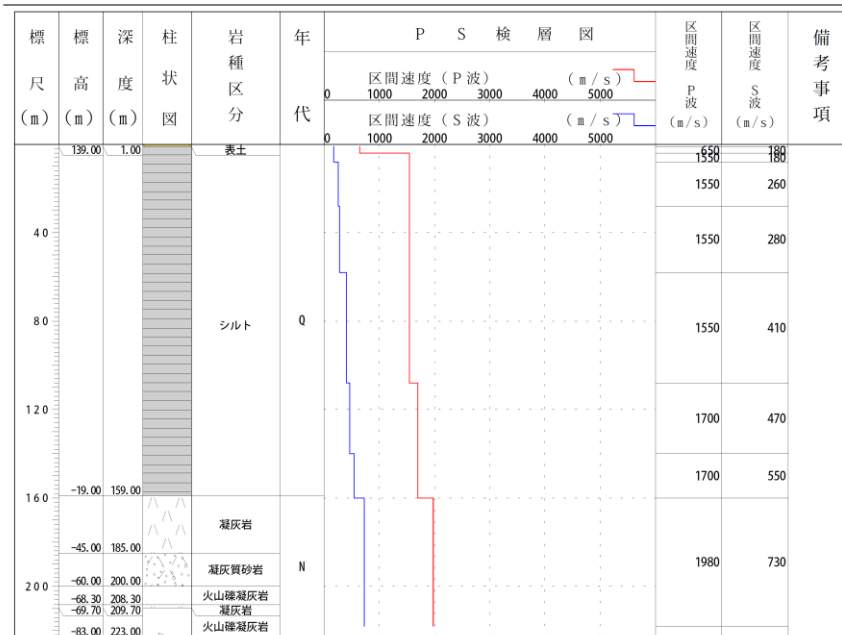
緯度: 43° 4' 56"

孔口標高: +140m

観測点コード: SBSH03

経度: 140° 49' 28"

総掘進長: 223.00m

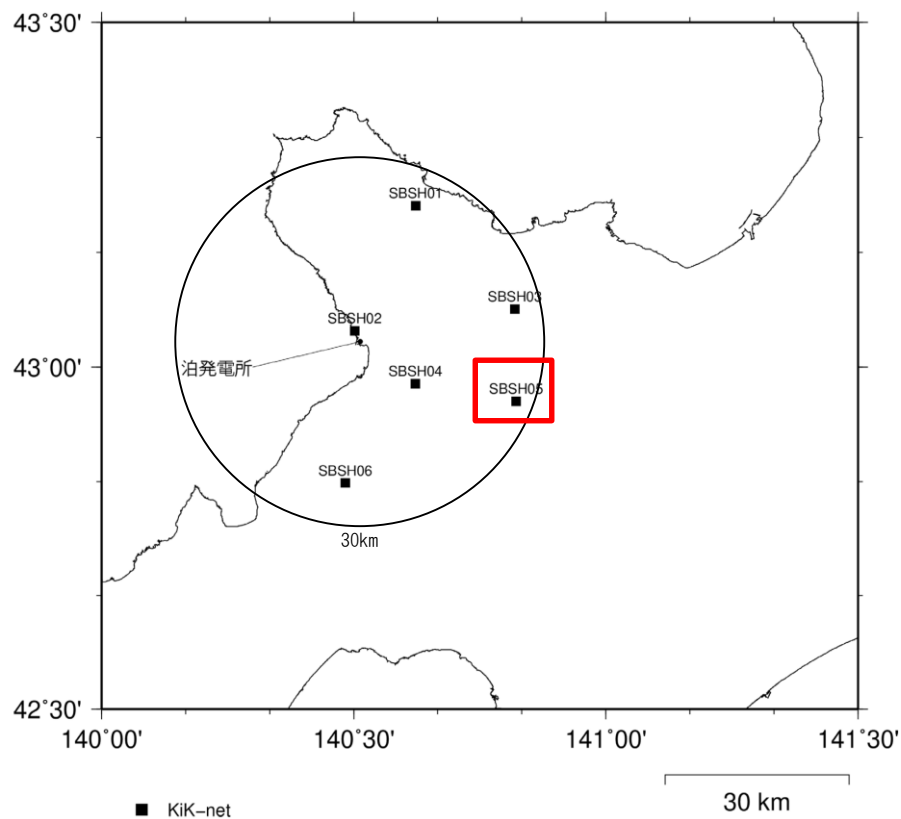


NIED 独立行政法人防災科学技術研究所

Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

4. 参考資料

4.3 泊発電所から半径30km以内の観測点の地盤情報(KiK-net倶知安)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名: 倶知安(くっちゃん)

所在地: 北海道虻田郡倶知安町字大和1176番

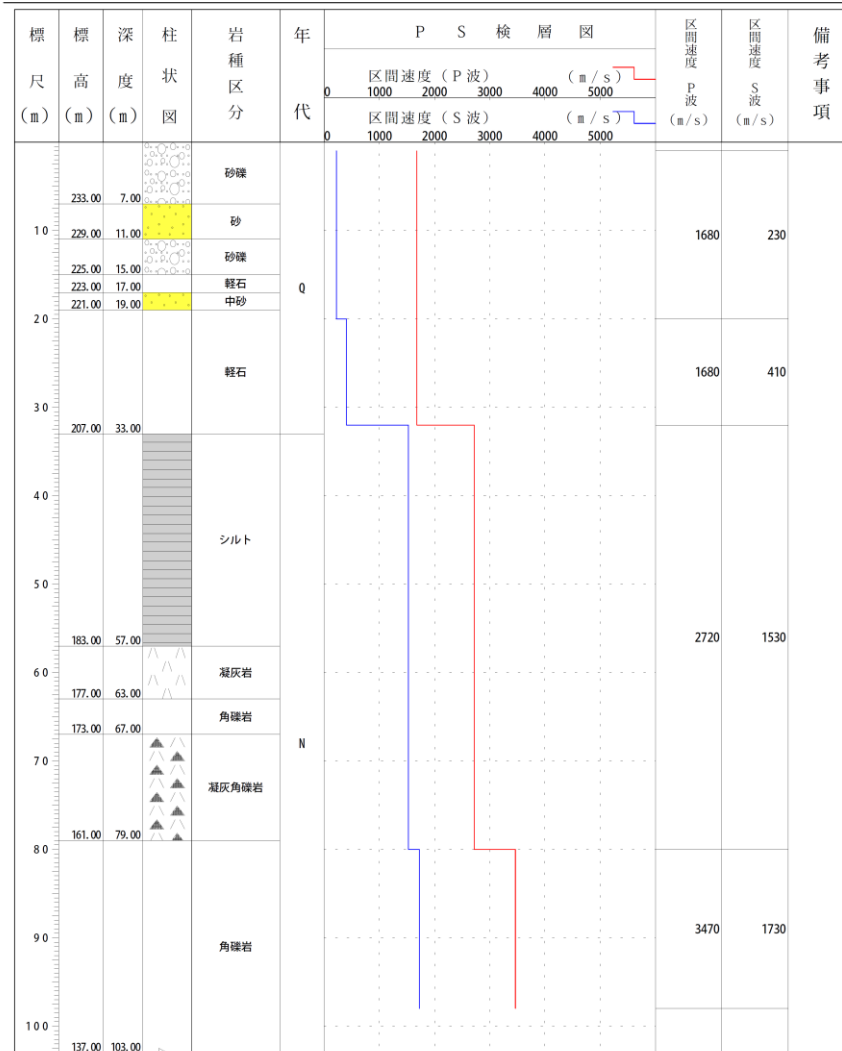
緯度: 42° 56' 52"

孔口標高: +240m

観測点コード: SBSH05

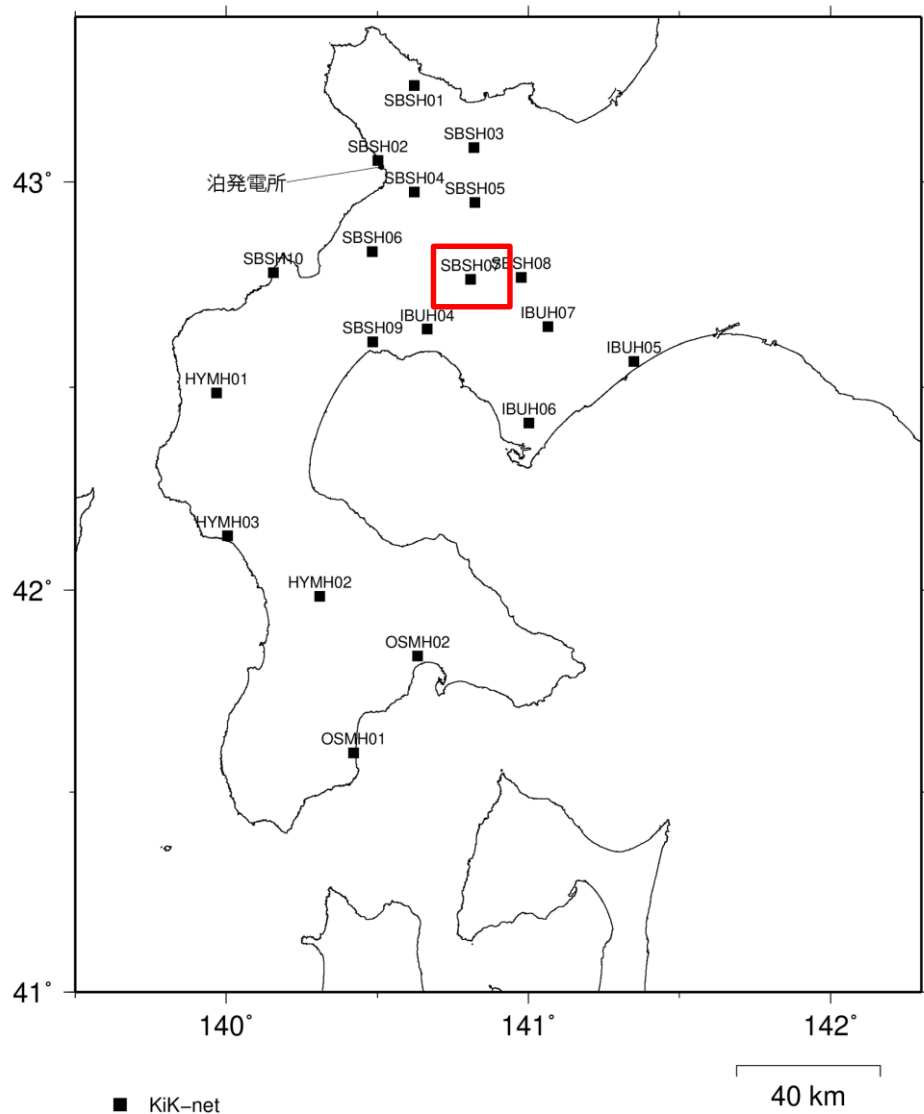
経度: 140° 49' 34"

総掘進長: 103.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net真狩)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：真狩(まっかり)

所在地：北海道虻田郡真狩村字光7番

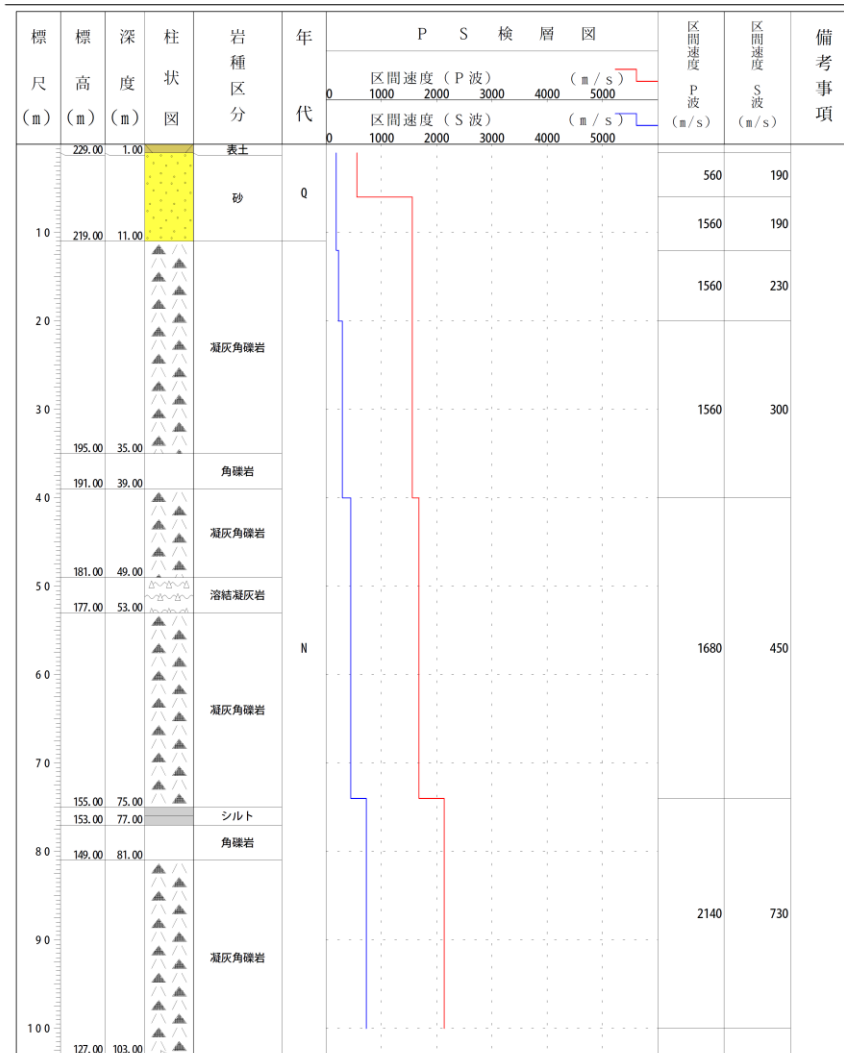
緯度：42°45'38"

孔口標高：+230m

観測点コード：SBSH07

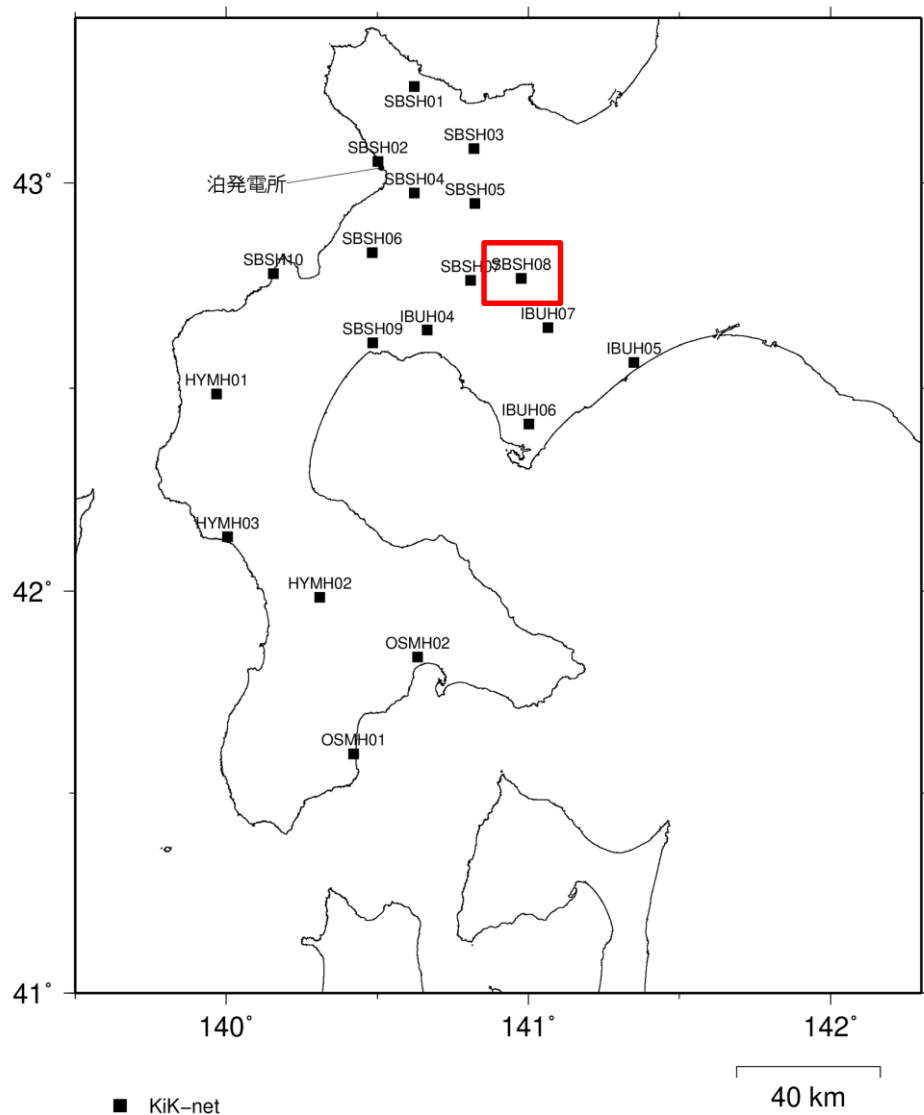
経度：140°48'43.5"

総掘進長：103.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net喜茂別)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：喜茂別(きもべつ)

所在地：北海道虻田郡喜茂別町字鈴川142-9

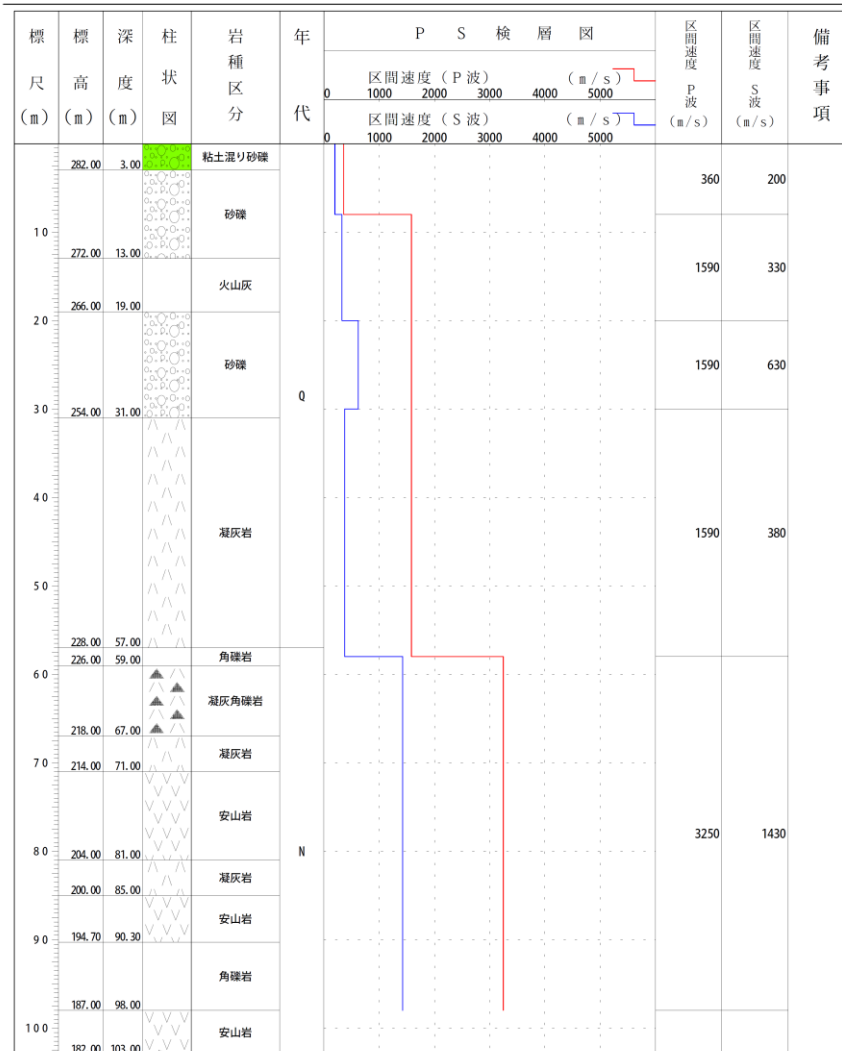
緯度：42°45'56"

孔口標高：+285m

観測点コード：SBSH08

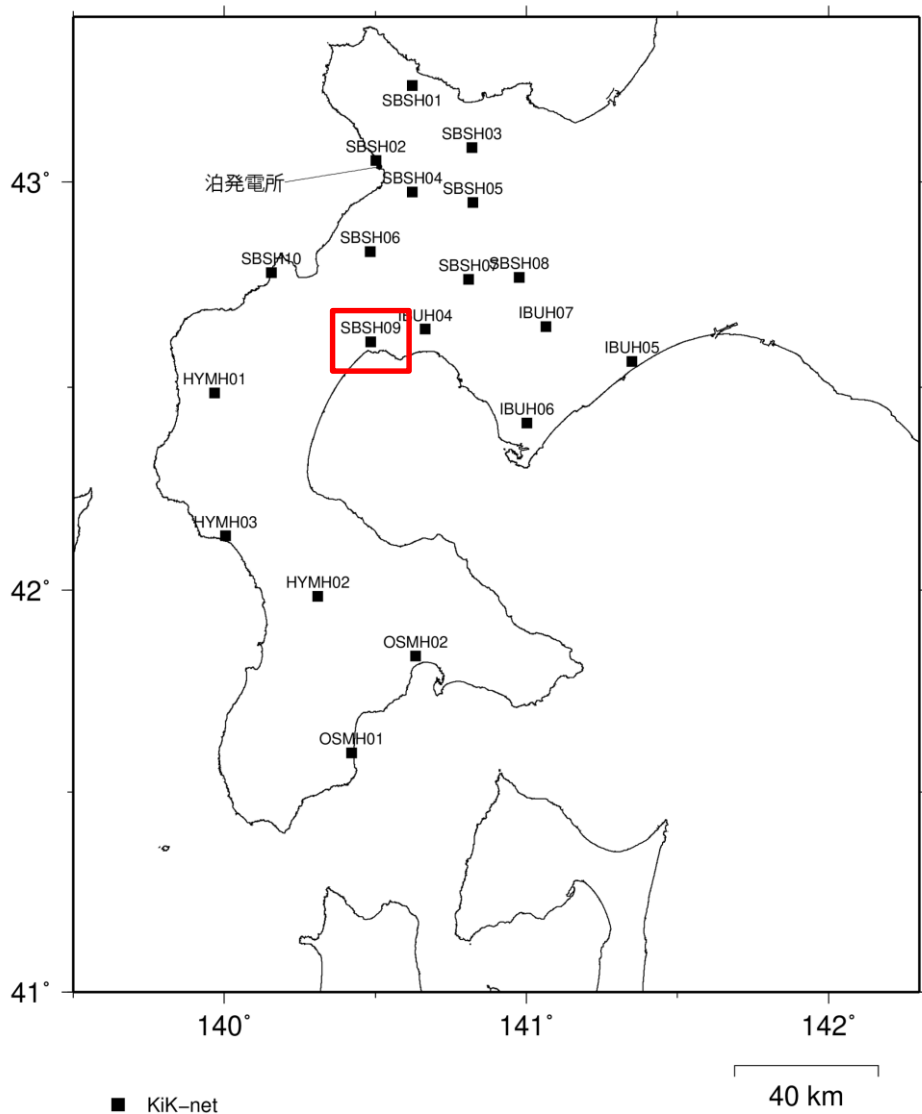
経度：140°58'49"

総掘進長：103.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net黒松内)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：黒松内(くろまつない)

所在地：北海道寿都郡黒松内町字大成496番2

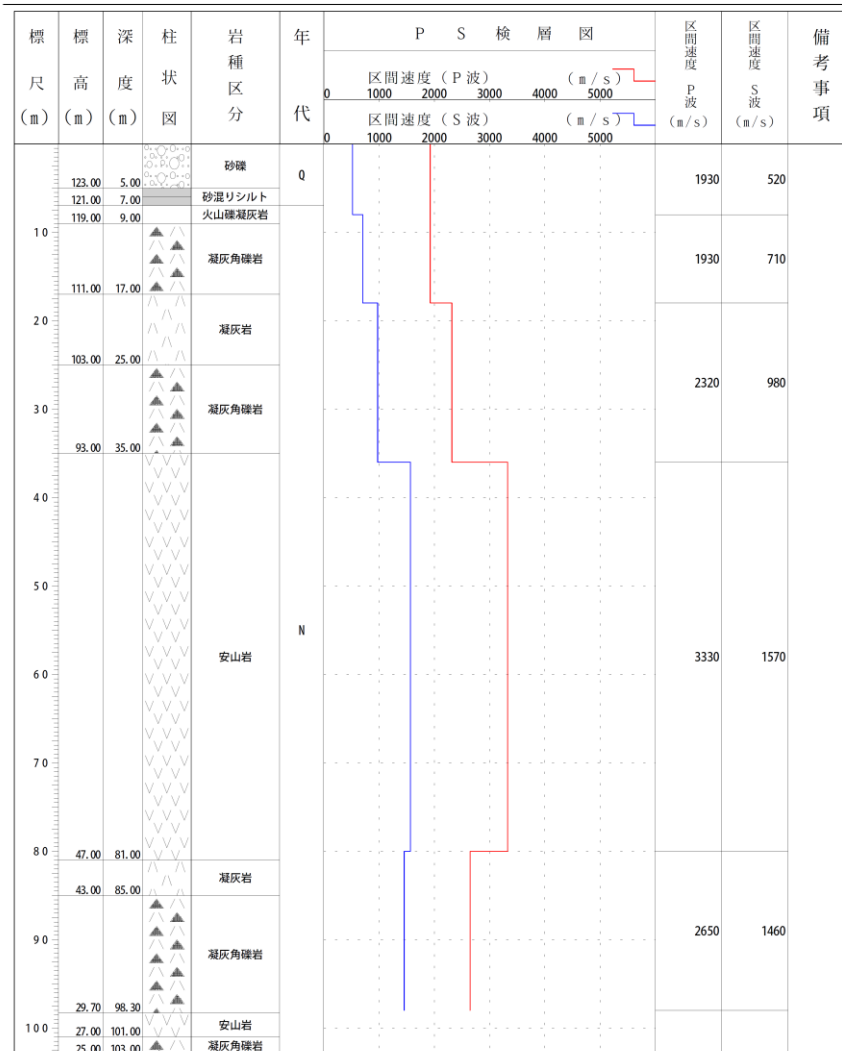
緯度：42°36'29"

孔口標高：+128m

観測点コード：SBSH09

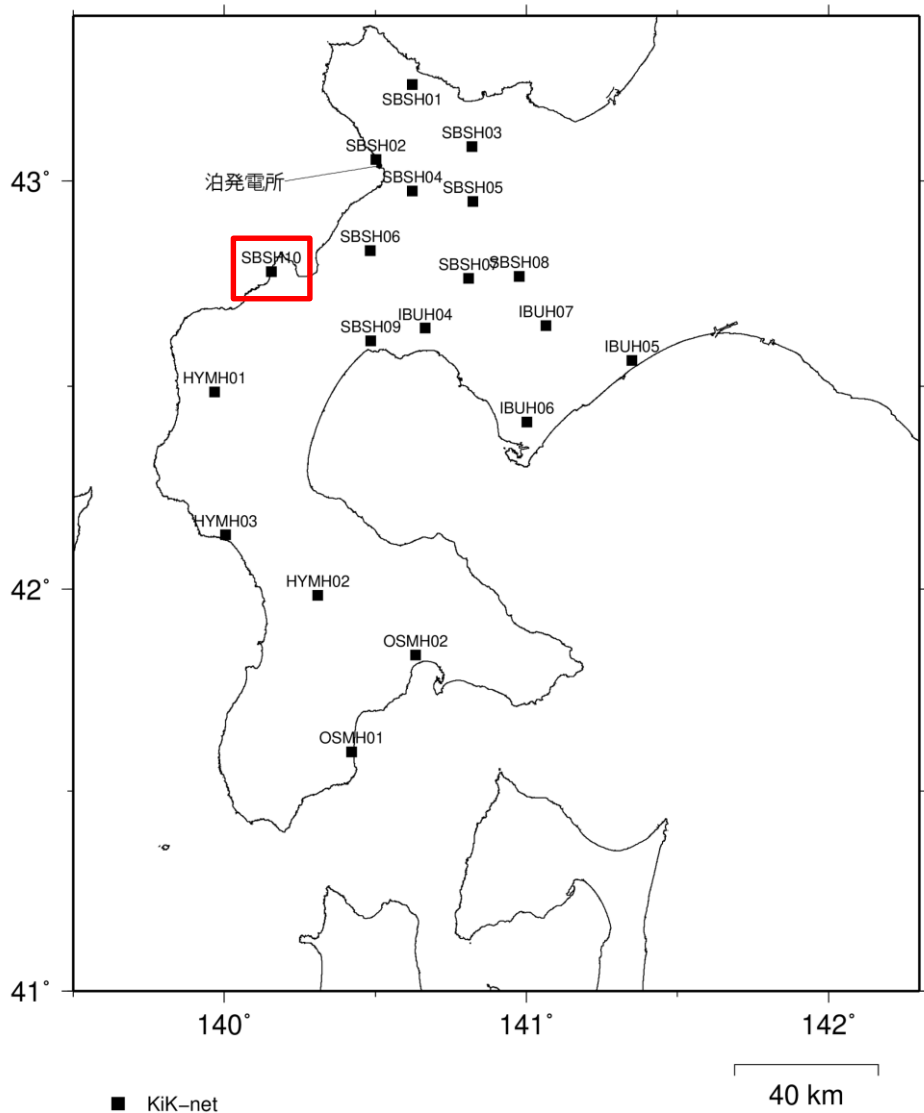
経度：140°29'16"

総掘進長：103.00m



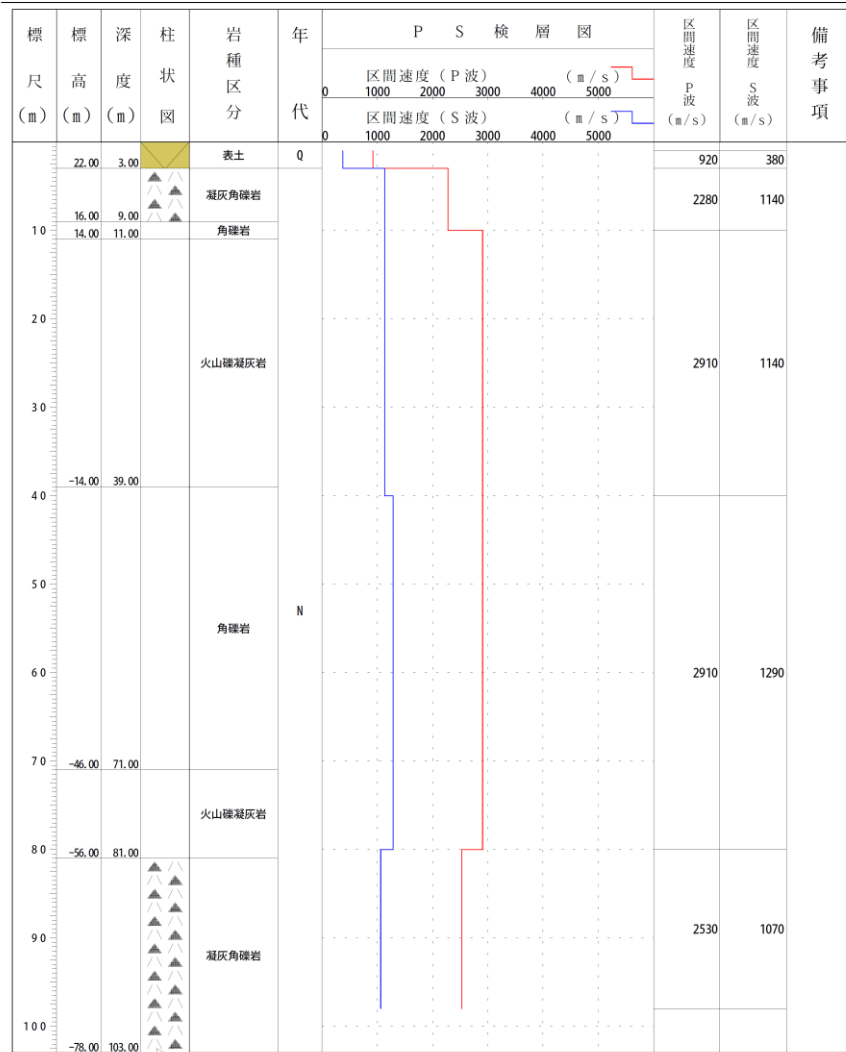
4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net島牧)



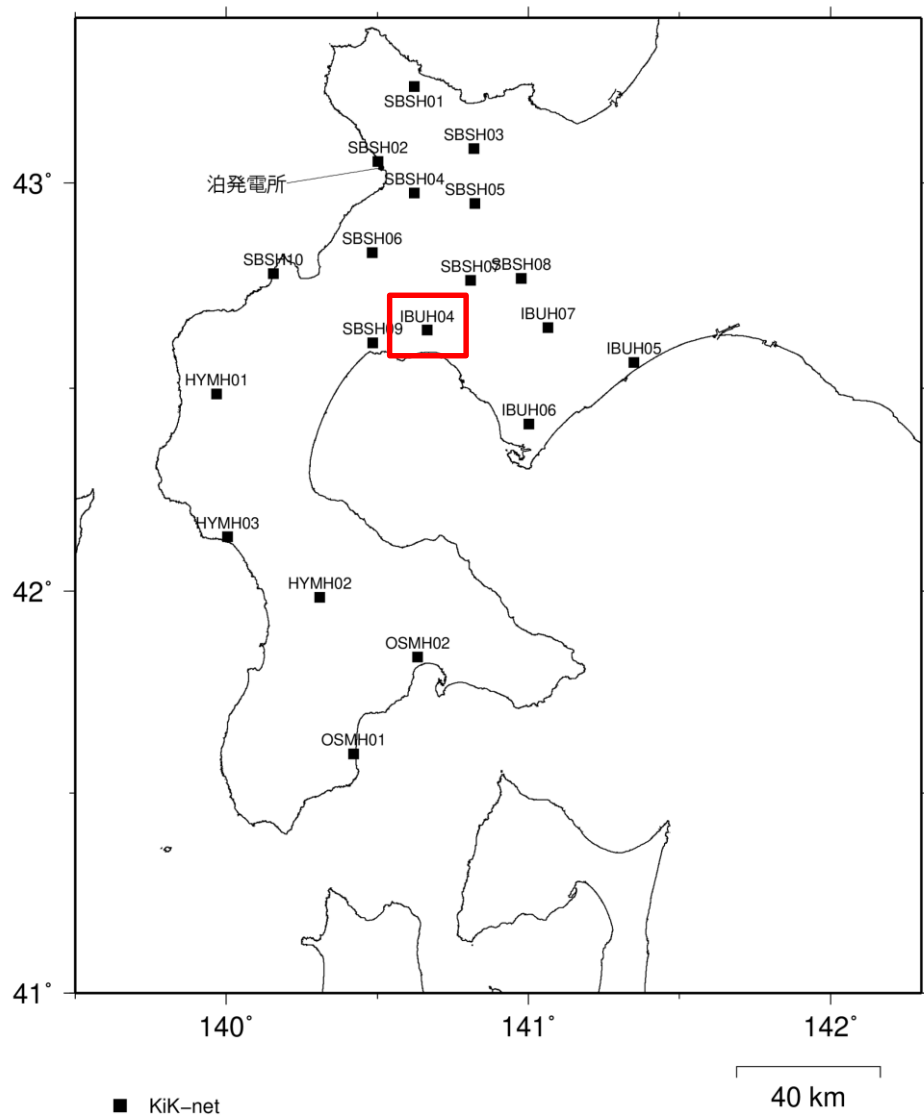
ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名： 島牧(しままき)
 所在地： 北海道島牧郡島牧村字富浦285番2
 緯度： 42° 46' 38"
 孔口標高： +25m
 観測点コード： SBSH10
 経度： 140° 9' 33.5"
 総掘進長： 103.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net豊浦)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：豊浦(とよら)

所在地：北海道虻田郡豊浦町字新山梨394-3

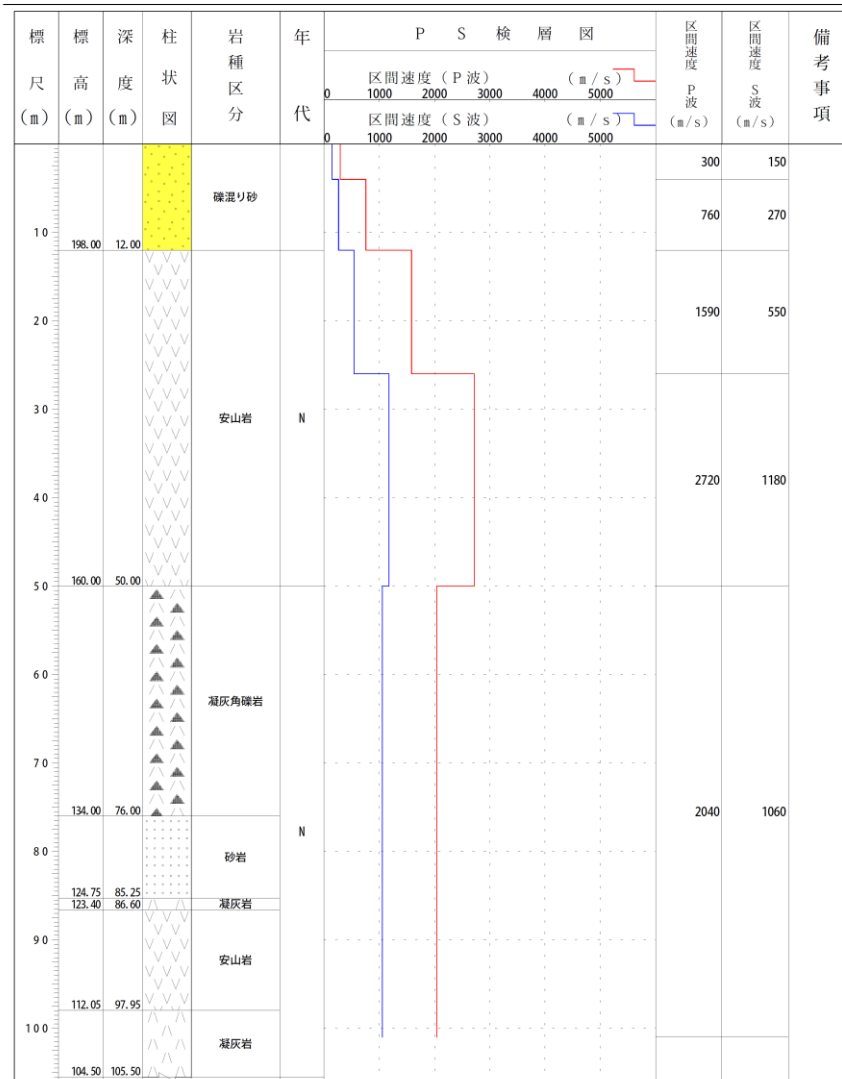
緯度：42°38'20.5"

孔口標高：+210m

観測点コード：IBUH04

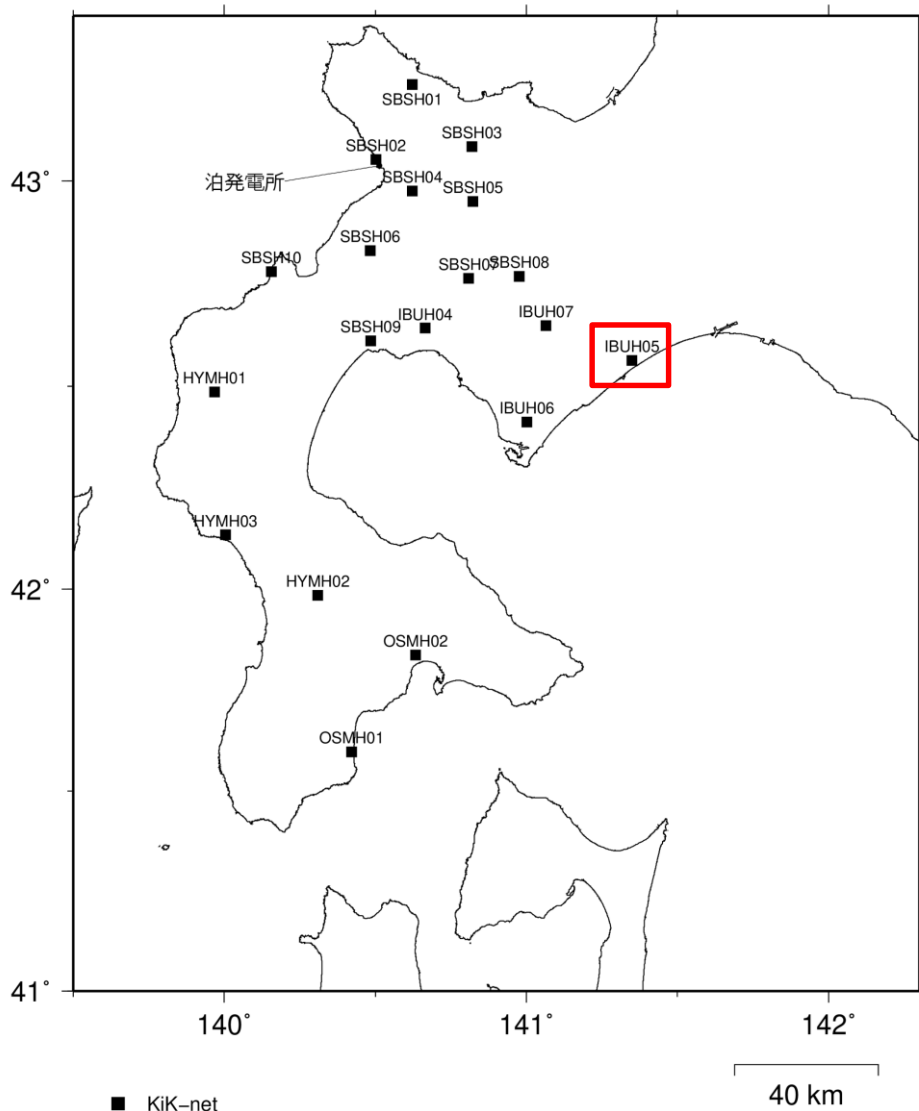
経度：140°40'7.00"

総掘進長：105.50m



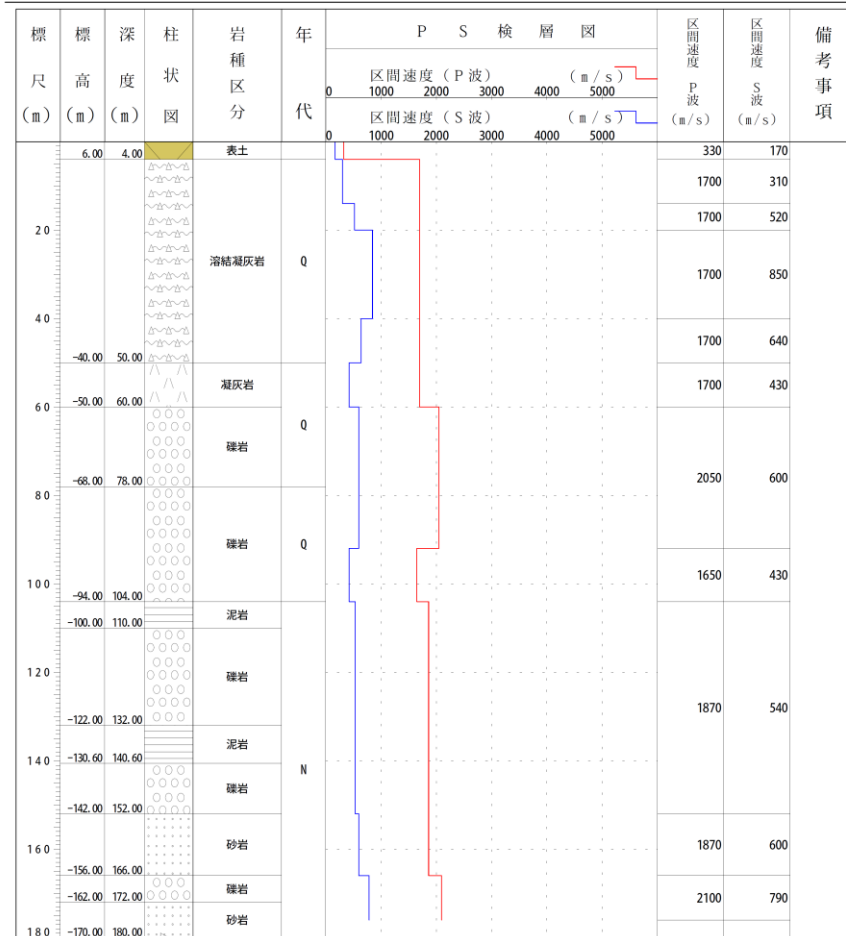
4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net白老)



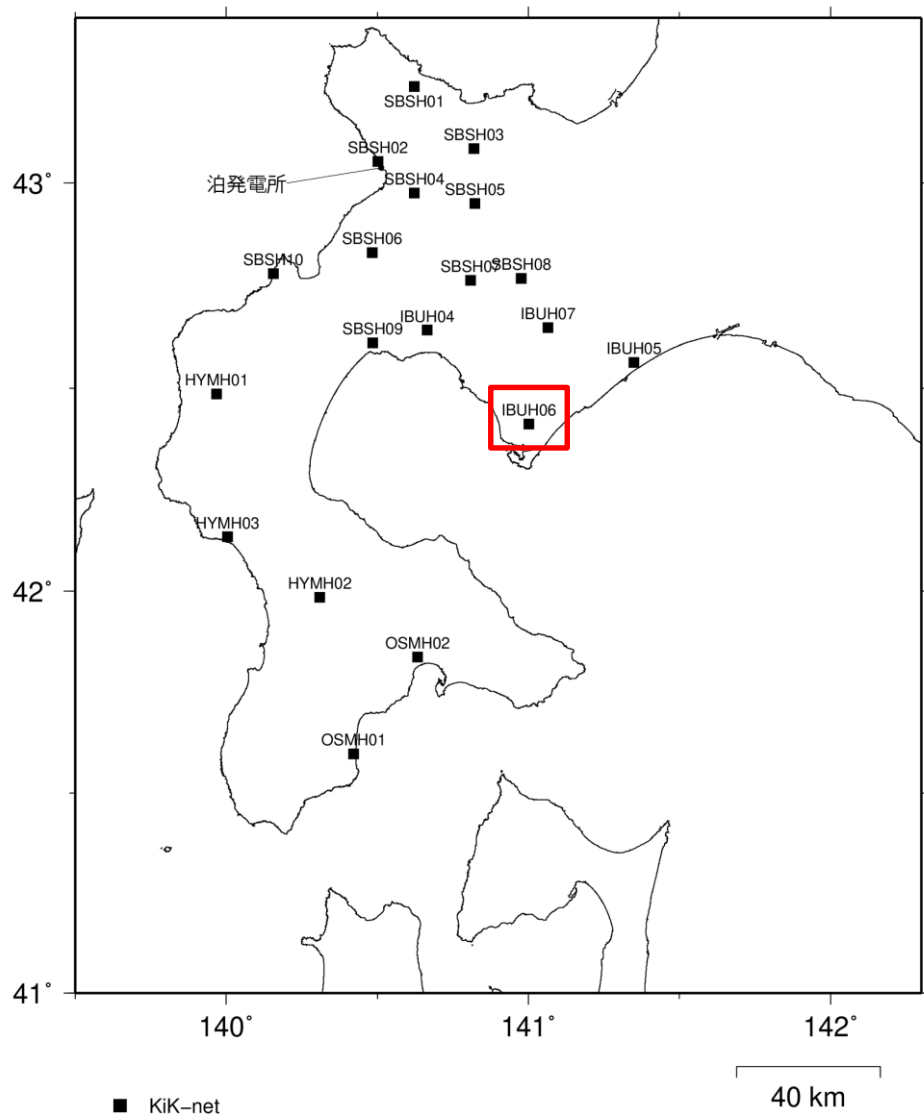
ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：白老(しらおい)
 所在地：北海道白老郡白老町緑丘4丁目636
 緯度：42° 33' 37.5"
 孔口標高：+10m
 観測点コード：IBUH05
 経度：141° 21' 12"
 総掘進長：180.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net室蘭)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：室蘭(むろらん)

所在地：北海道室蘭市香川町224番1

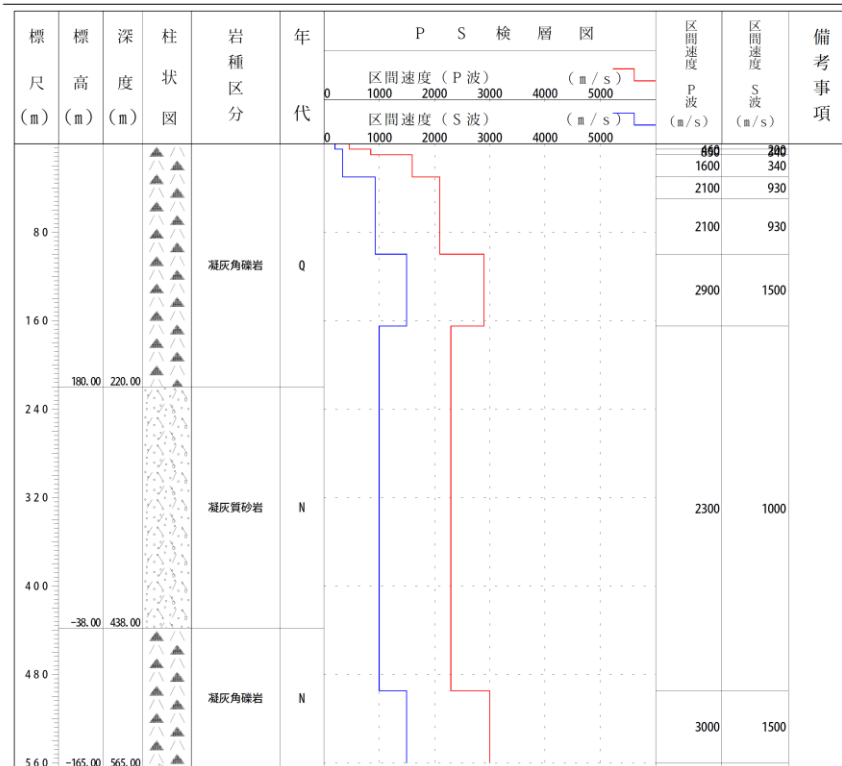
緯度：42° 24' 34"

孔口標高：+400m

観測点コード：IBUH06

経度：141° 0' 19"

総掘進長：565.00m

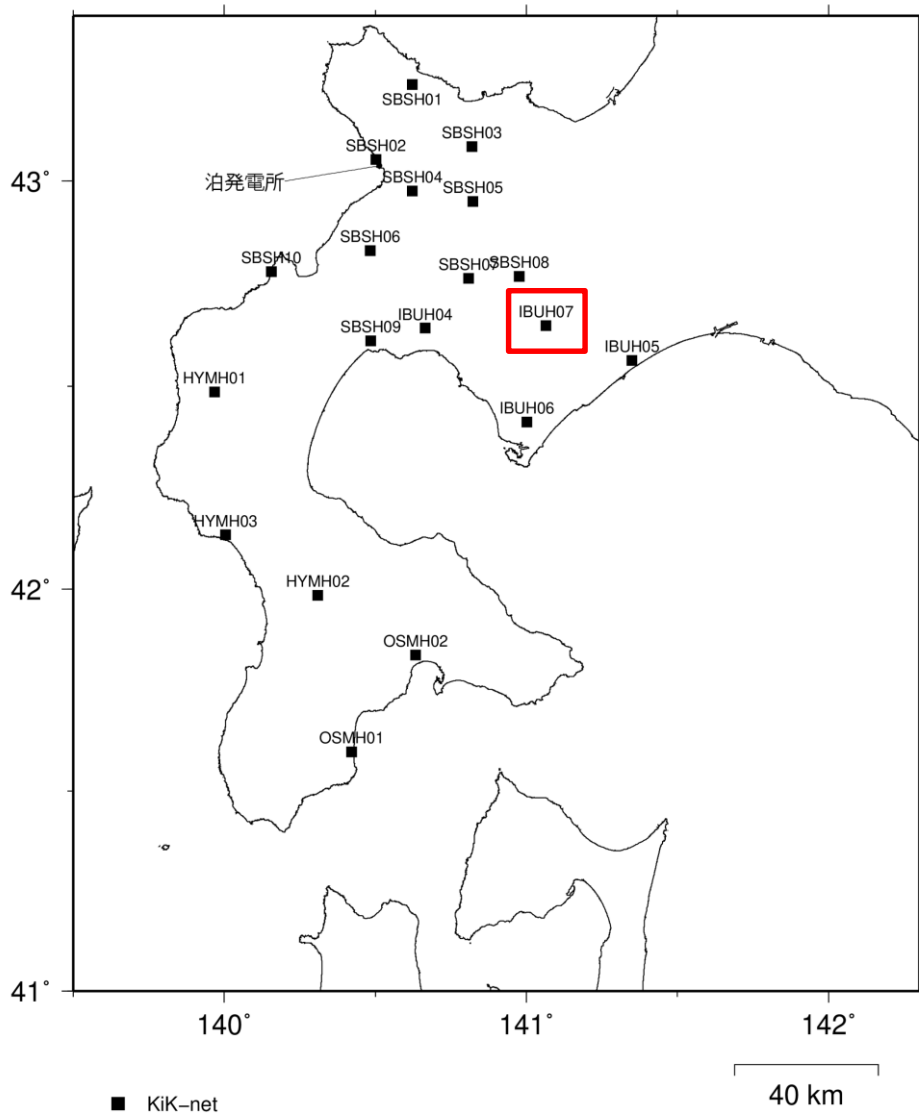


NIED 独立行政法人防災科学技術研究所

Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

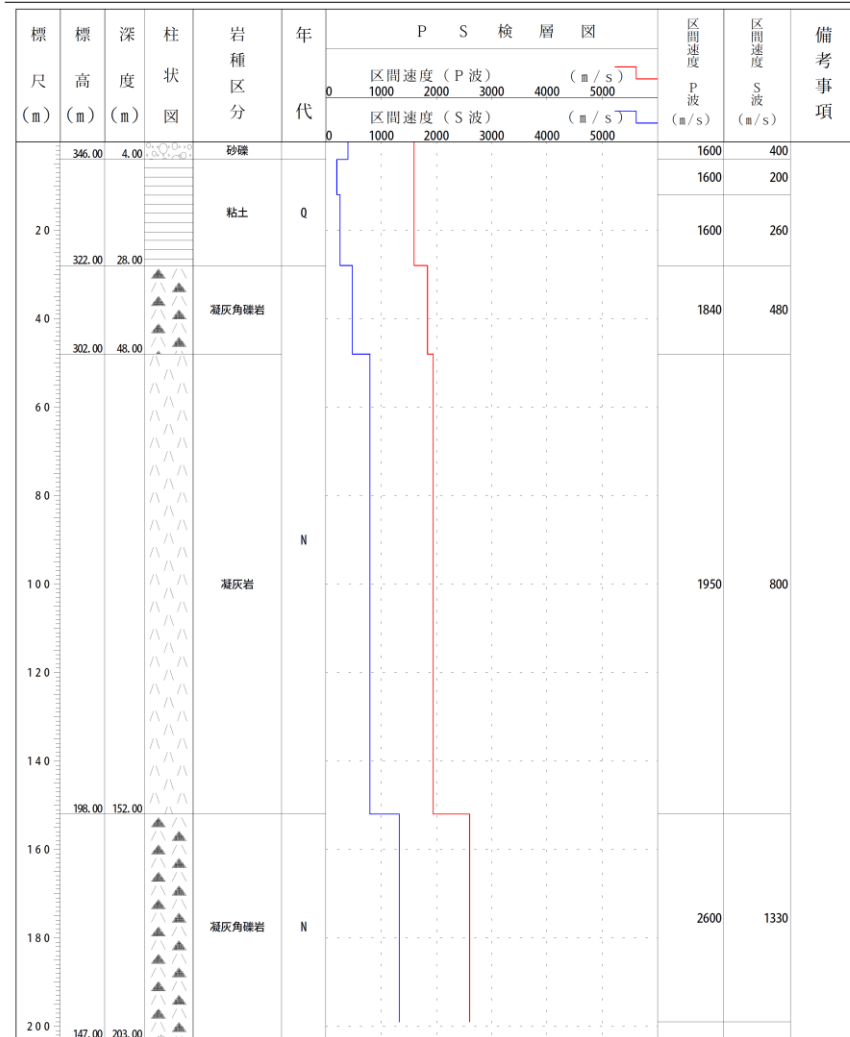
4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net大滝)



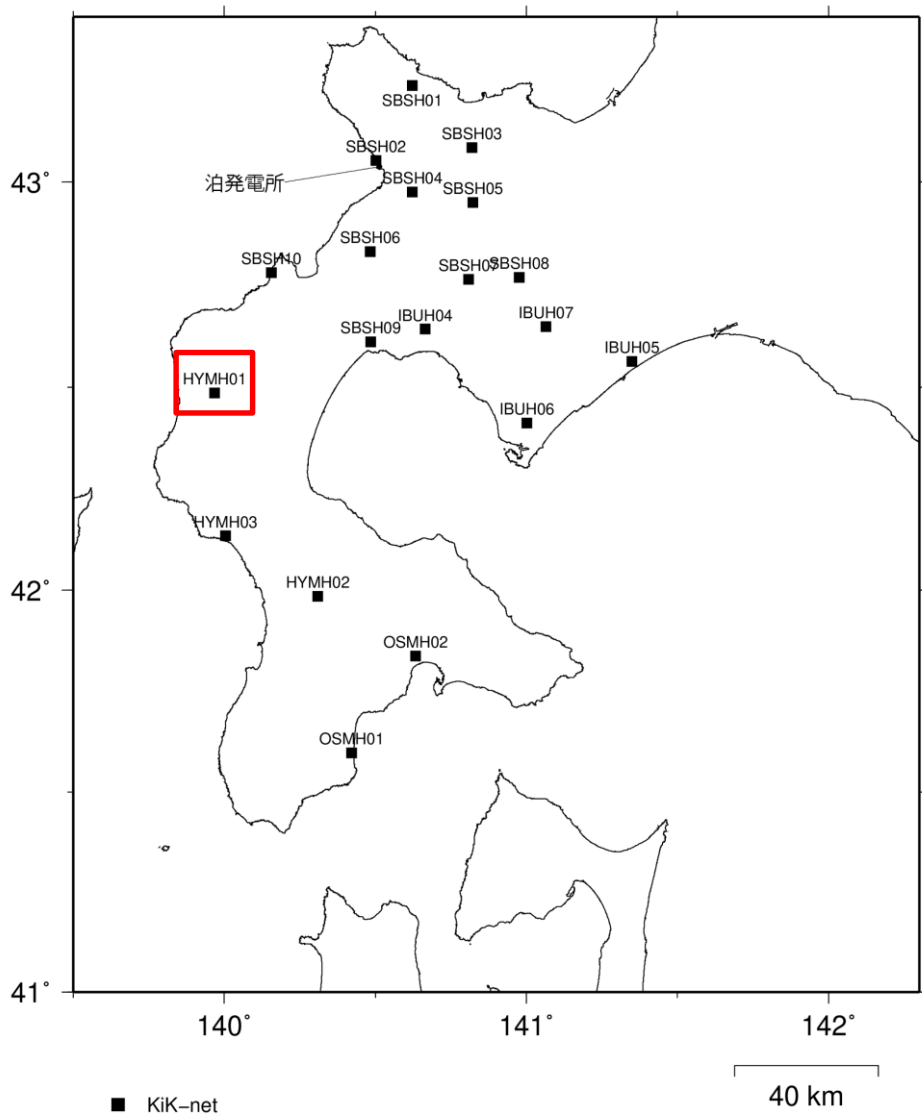
ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：大滝(おおたき)
 所在地：北海道有珠郡大滝村字大成町1番地
 緯度：42°38'42.5"
 孔口標高：+350m
 観測点コード：IBUH07
 経度：141°4'4.5"
 総掘進長：203.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net北檜山)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：北檜山(きたひやま)

所在地：北海道瀬棚郡北檜山町字小倉山567番地

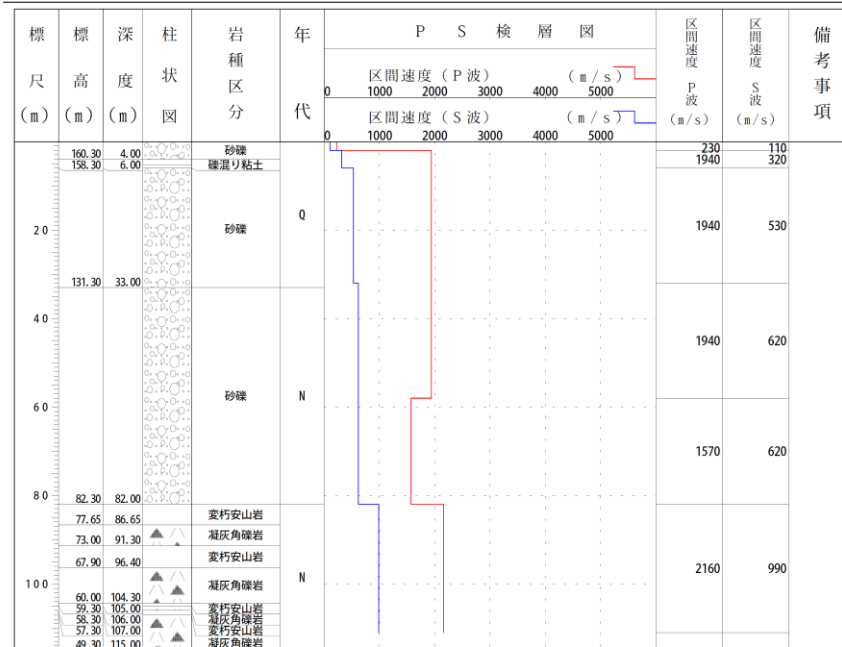
観測点コード：HYMH01

緯度：42°28'57.5"

経度：139°58'17.0"

孔口標高：+164m

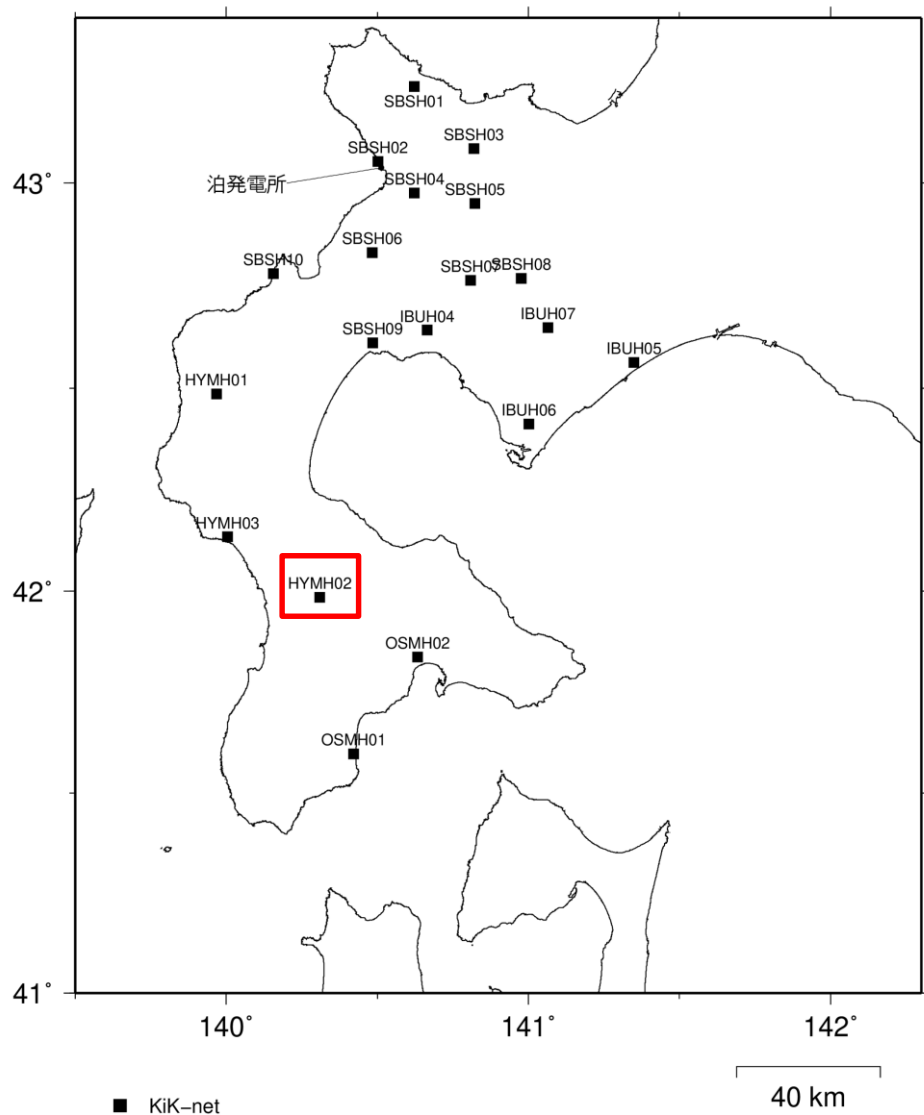
総掘進長：115.00m



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net厚沢部)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：厚沢部(あっさぶ)

所在地：北海道檜山郡厚沢部町清水101-1

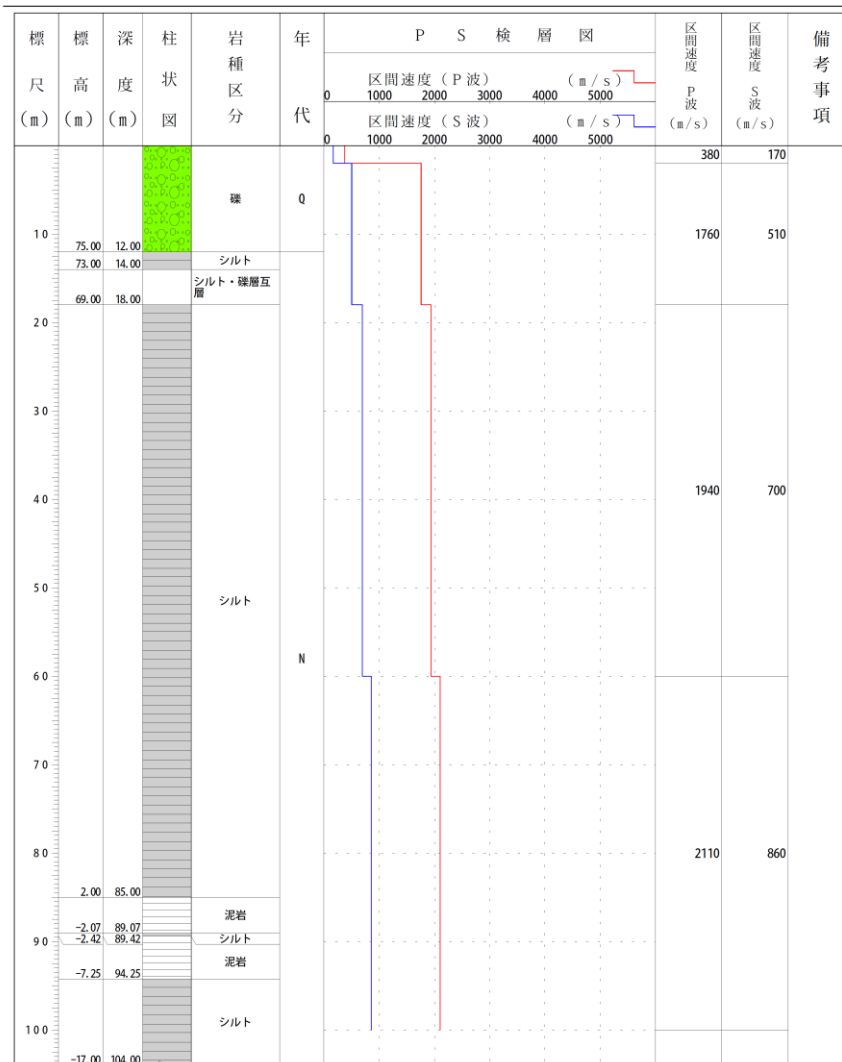
緯度：41° 58' 59"

孔口標高：+87m

観測点コード：HYMH02

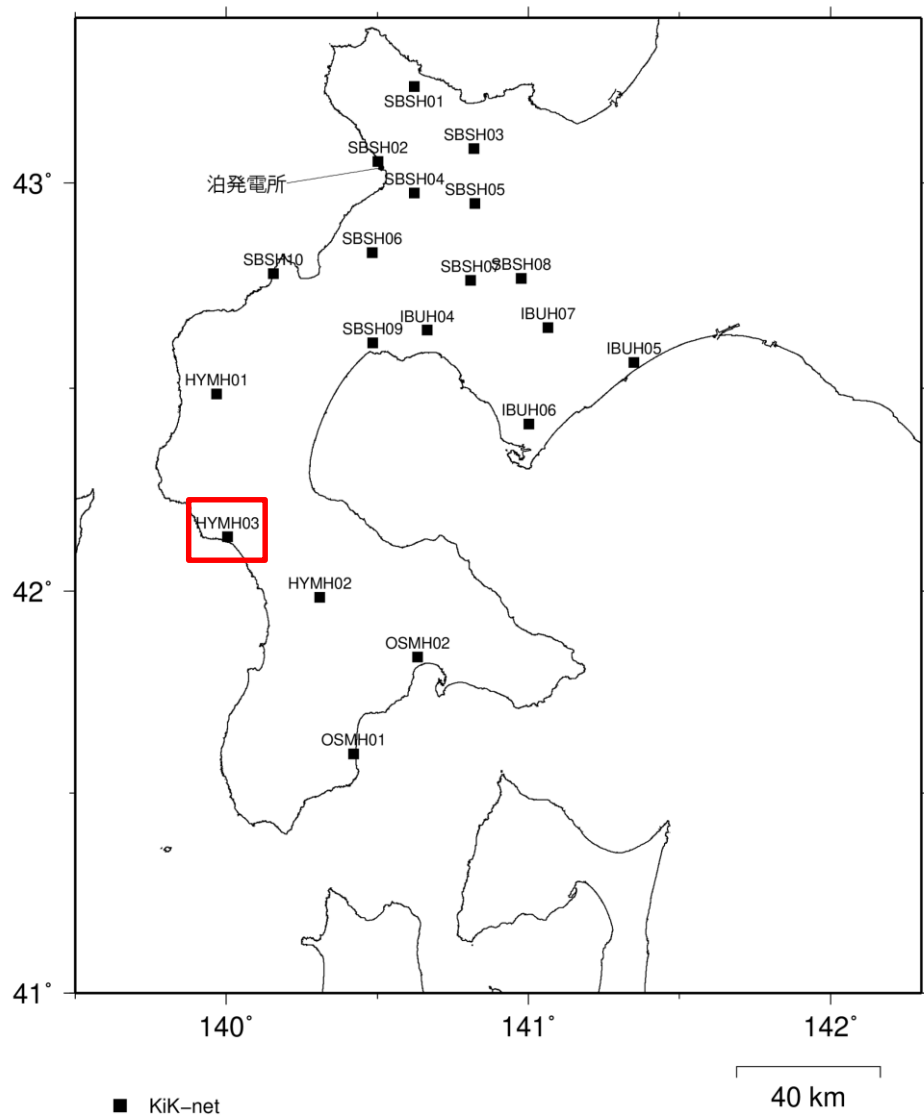
経度：140° 18' 45"

総掘進長：104.00m



4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net熊石)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：熊石(くまいし)

所在地：北海道爾志郡熊石町字平331番地3

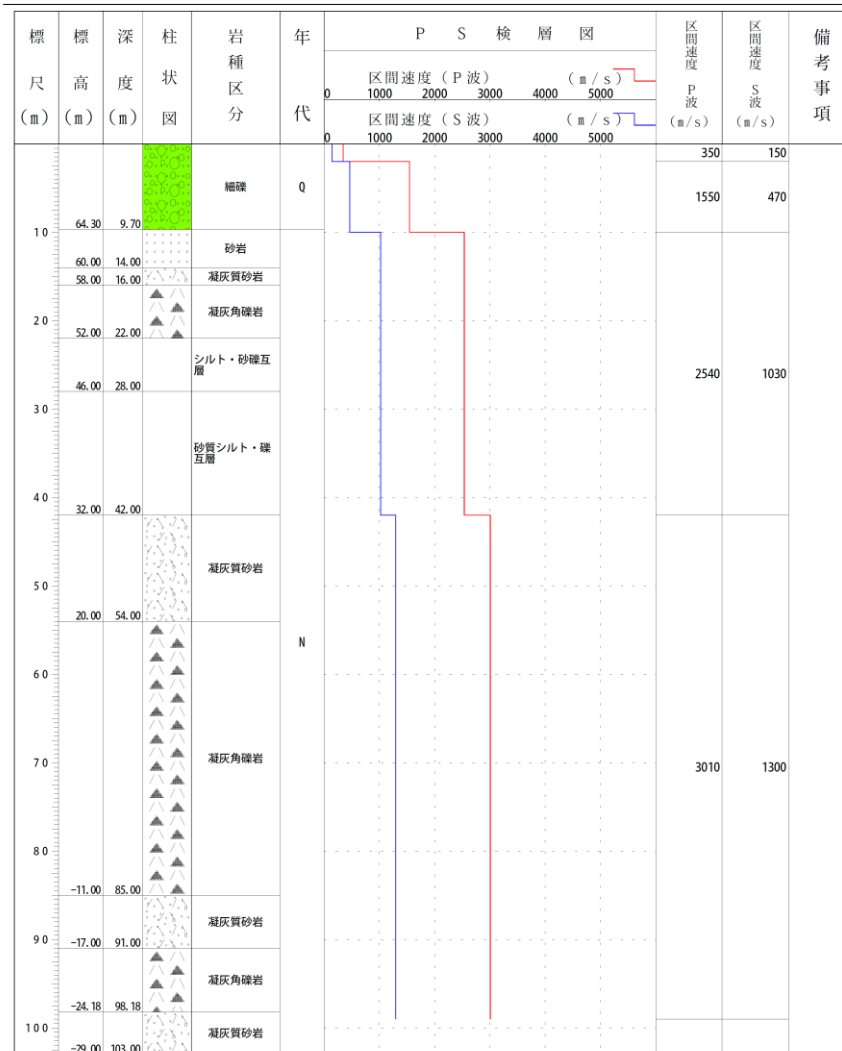
緯度：42° 7' 55"

孔口標高：+74m

観測点コード：HYMH03

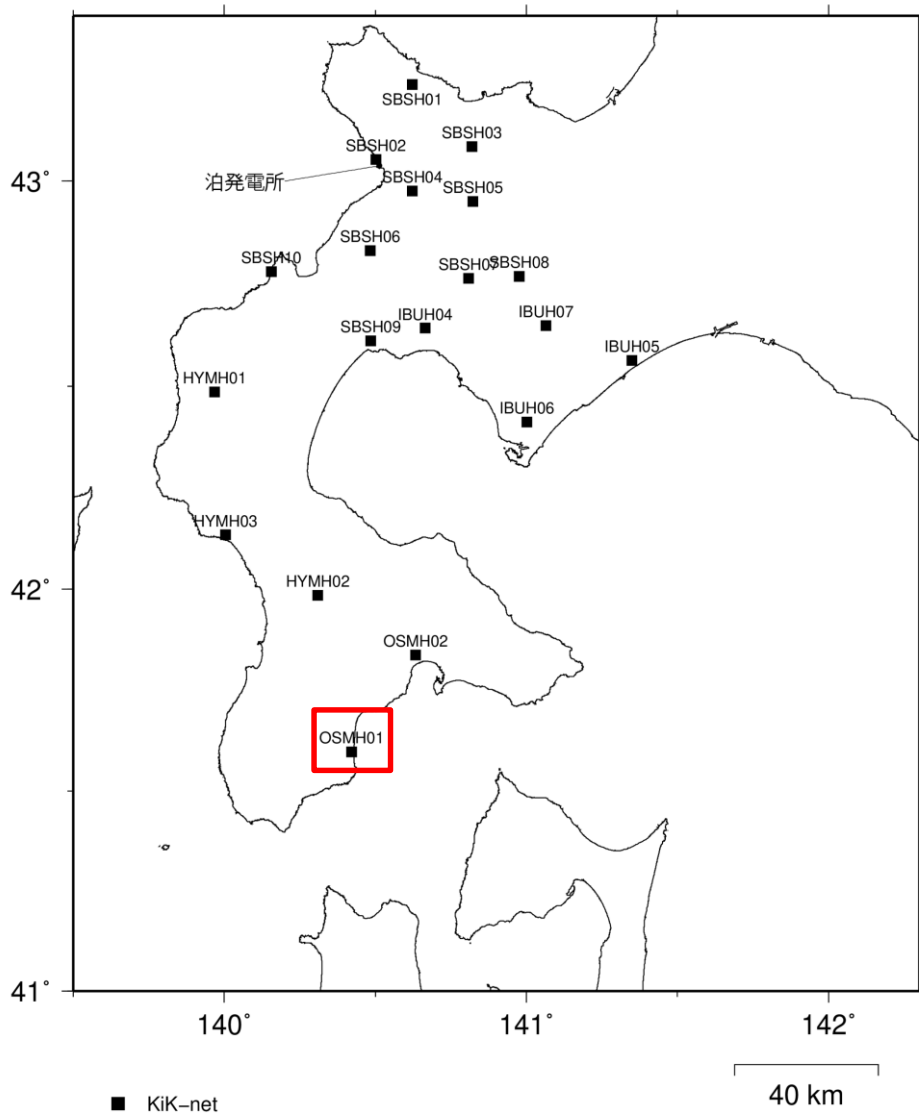
経度：140° 0' 27"

総掘進長：103.00m



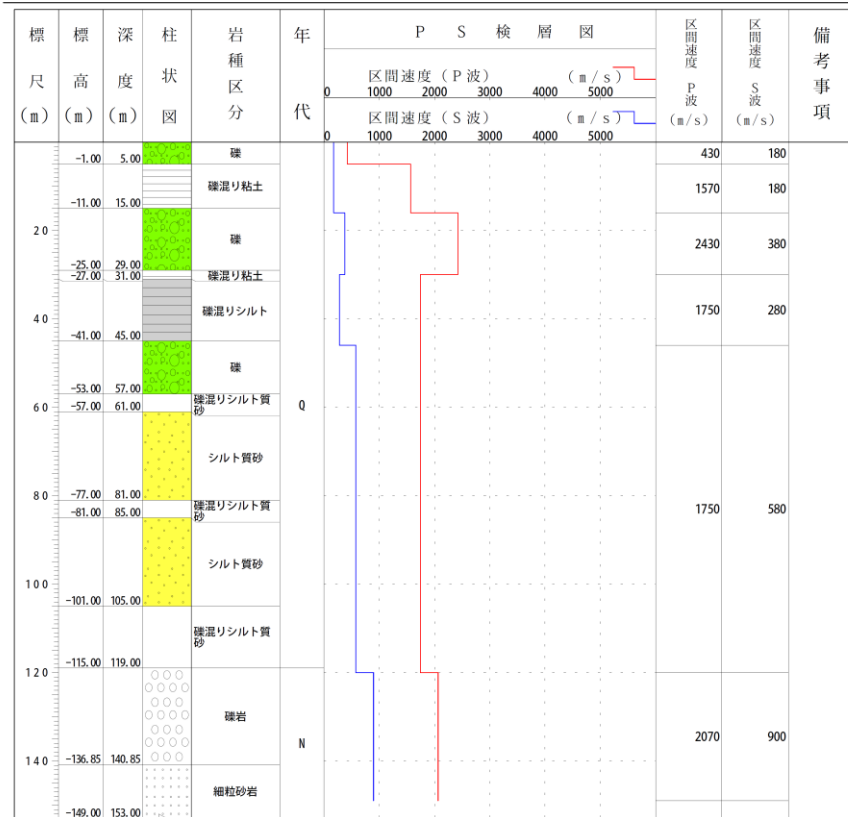
4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net知内)



ボーリング柱状図(暫定版)

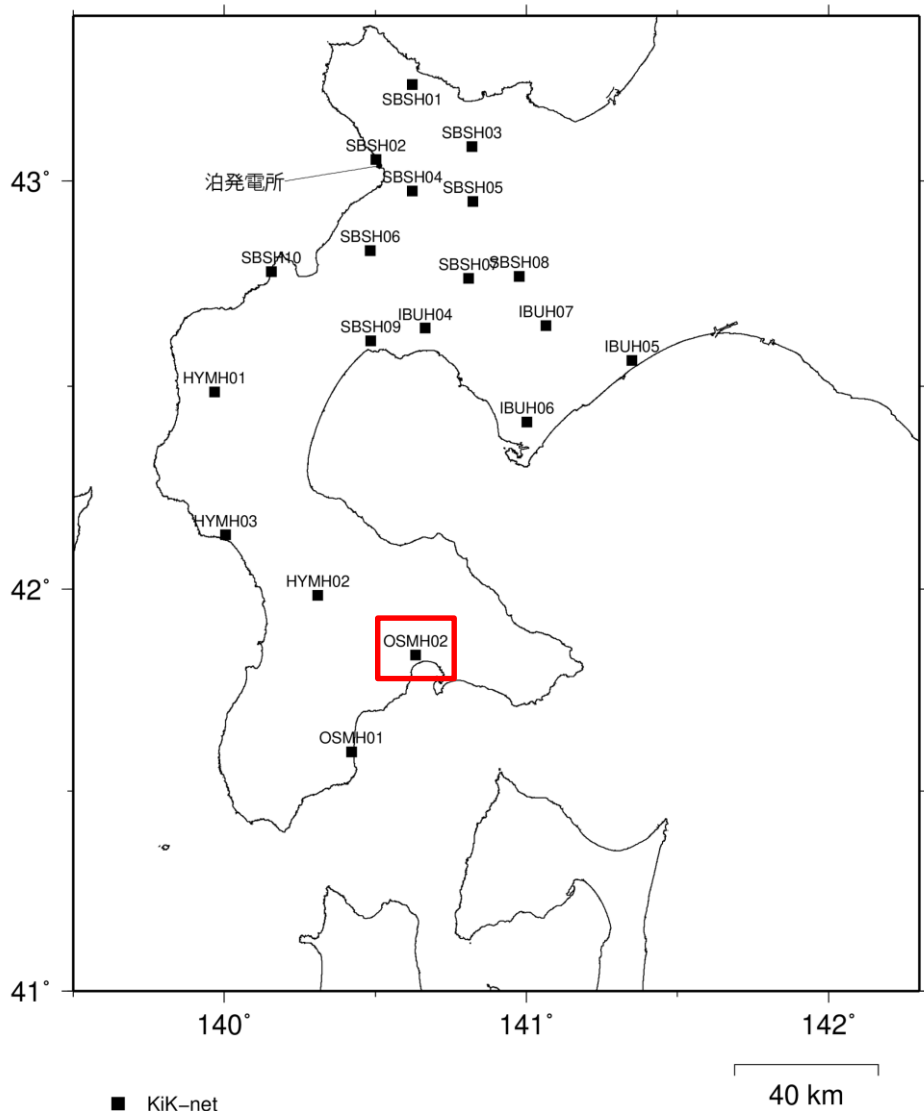
観測点名： 知内(しりうち)
 所在地： 北海道上磯郡知内町字重内20番地の6
 緯度： 41° 35' 42.5"
 孔口標高： +4m
 観測点コード： OSMH01
 経度： 140° 25' 27"
 総掘進長： 153.00m



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
 Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

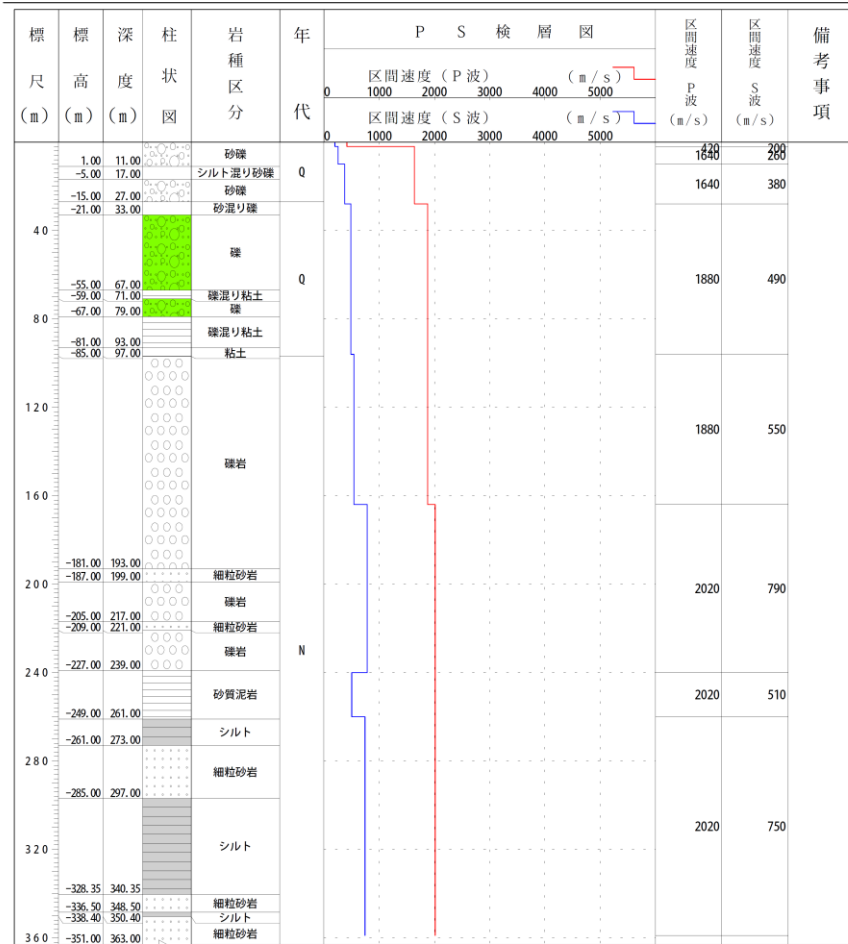
4. 参考資料

4.4 北海道西部に位置するKiK-net観測点の地盤情報(KiK-net上磯)



ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名: 上磯(かみいそ)
 所在地: 北海道上磯郡上磯町字大工川163、164
 緯度: 41° 50' 5.50"
 標高: +12m
 観測点コード: OSMH02
 経度: 140° 38' 12.0"
 総掘進長: 363.00m



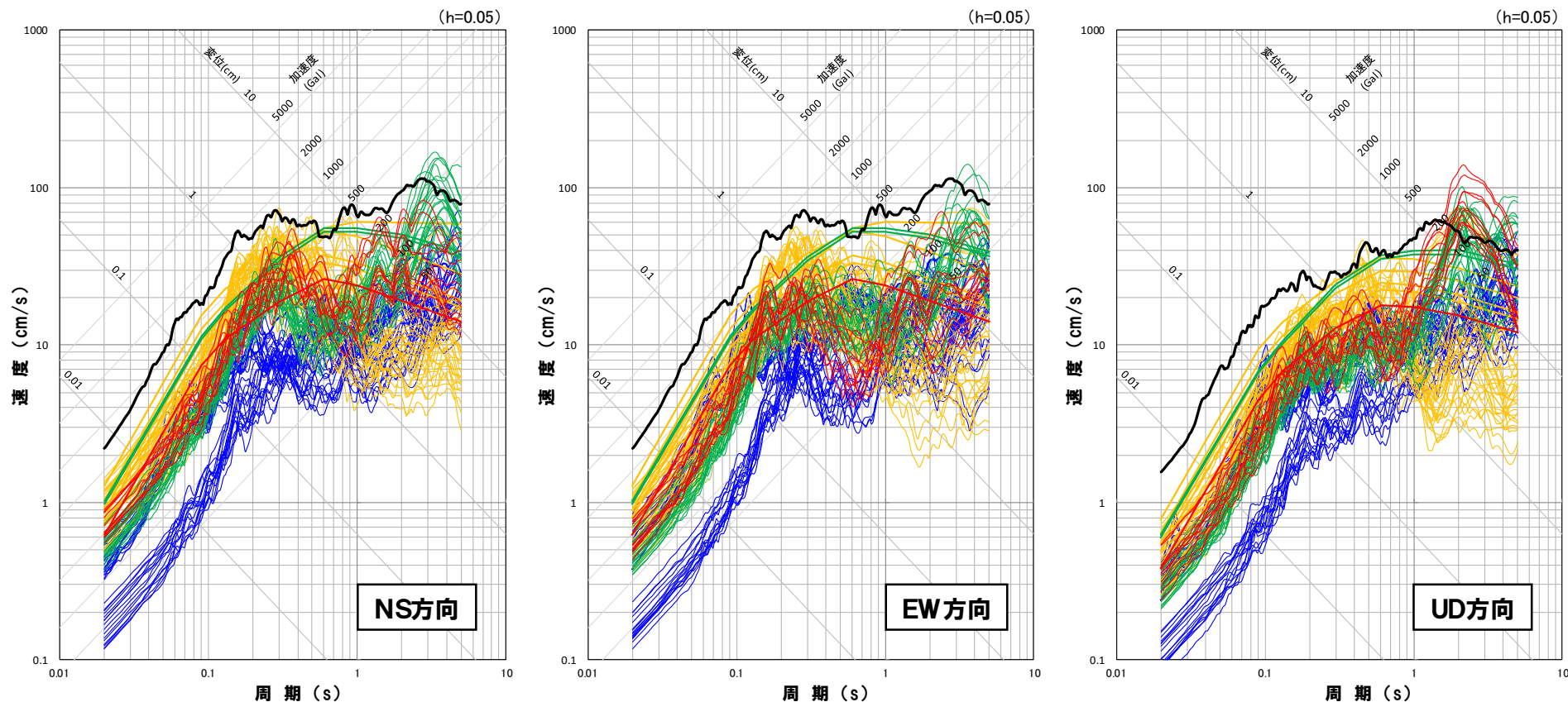
余白

4. 参考資料

4.5 地震動評価結果の比較

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動との比較

○標準応答スペクトルを考慮した地震動と敷地ごとに震源を特定して策定する地震動(令和3年10月22日審査会合)の比較を下図に示す。



【震源を特定せず策定する地震動】

— 標準応答スペクトルを考慮した地震動

【敷地ごとに震源を特定して策定する地震動】

— 尻別川断層による地震

— F_S-10 断層～岩内堆東撓曲～岩内堆南方背斜による地震

— 積丹半島北西沖の断層による地震

— F_B-2 断層による地震

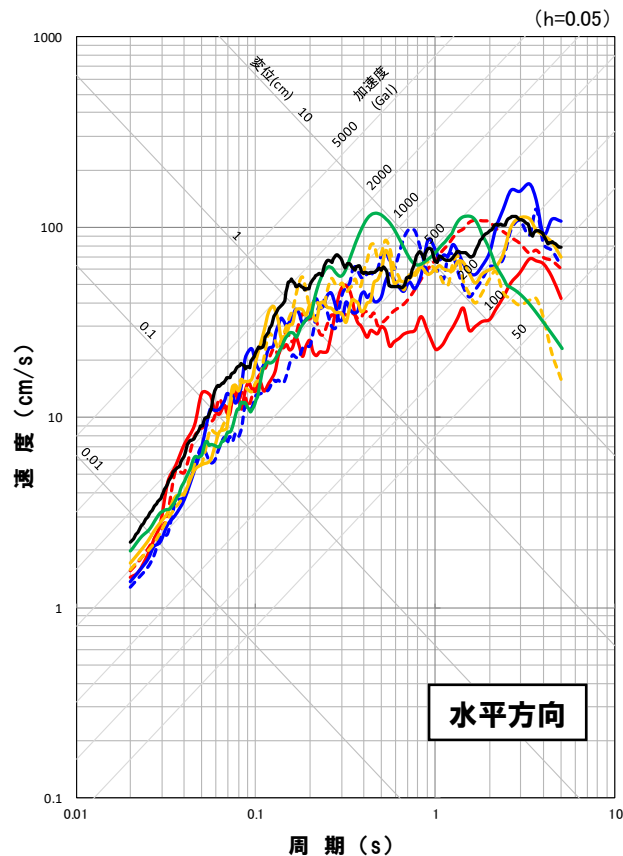
※太線は応答スペクトルに基づく地震動評価結果

4. 参考資料

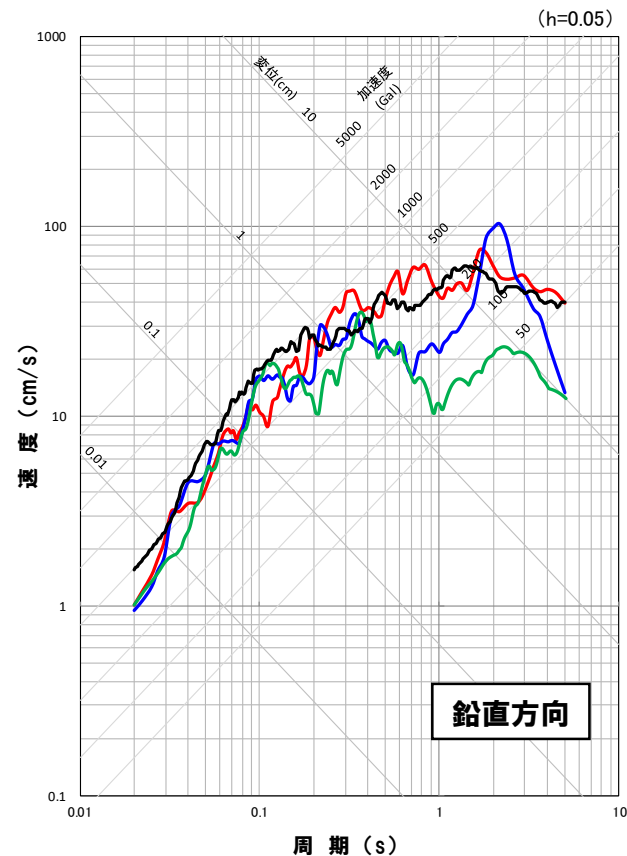
4.5 地震動評価結果の比較

震源を特定せず策定する地震動との比較

○標準応答スペクトルを考慮した地震動と震源を特定せず策定する地震動(平成27年12月25日審査会合)の比較を下図に示す。



実線: NS方向, ダム軸方向
破線: EW方向, 上下流方向



- 標準応答スペクトルを考慮した地震動
- 2008年岩手・宮城内陸地震(栗駒ダム[右岸地山])
- 2008年岩手・宮城内陸地震(KiK-net金ヶ崎)
- 2008年岩手・宮城内陸地震(KiK-net一関東)
- 2004年北海道留萌支庁南部地震(K-NET港町)

- 物理探査ハンドブック(1999):公益社団法人物理探査学会
- 太田外気晴・丹羽正徳・高橋克也・八幡夏恵子(1985):物理探査と室内試験から評価される V_p , V_s 及びポアソン比の関係, 日本地震学会講演予稿集, 1985年春季大会, B12, 108
- 独立行政法人 防災科学技術研究所(2005):石狩低地東縁断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料 第283号
- S.Noda, 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 Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering,Oct.16-18,Istanbul,399-408
- 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015:一般社団法人日本電気協会
- 気象庁:地震年報(1923~2012)
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明(1994a):ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 461, 19-28
- 気象庁ホームページ:各種データ・資料「<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>」