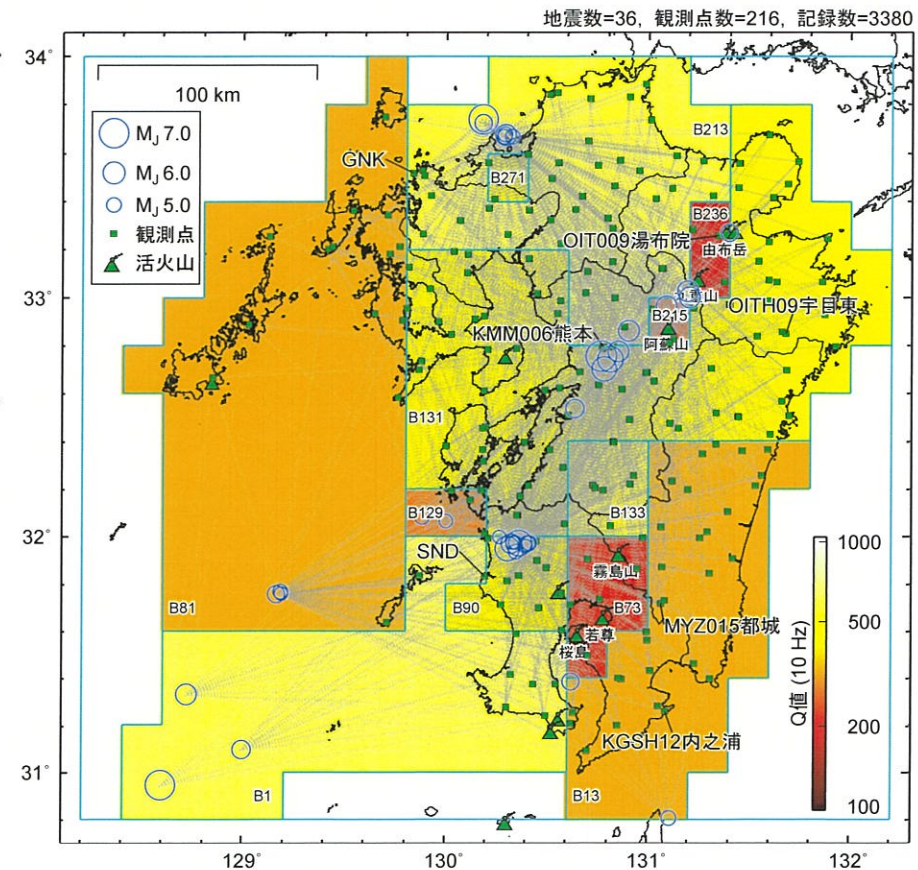


【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 友澤ほか(2019b)⁷⁾は、火山帯周辺では伝播経路特性が複雑であることから、観測記録を震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性に分離する際には、伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することの重要性を指摘。
- 友澤ほか(2019a)^{5)、6)}は、九州地域で発生した地震の強震観測記録を収集し、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析により推定。
- ブロックインバージョン解析は、友澤ほか(2019b)の手法を用いて、伝播経路特性の最適な領域分割とそれに基づく不均質構造を推定。
- 全領域で均質な減衰構造を仮定した手法と本手法の回帰残差の分析を実施し、減衰構造の不均質性を考慮することの利点を定量的に評価。



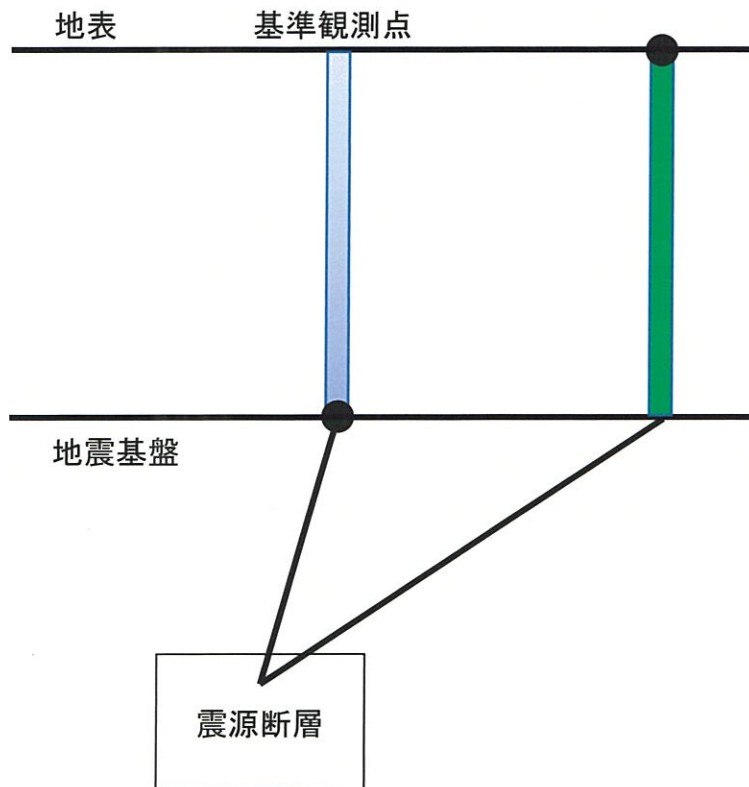
検討に用いたデータセットと推定した不均質減衰構造

友澤ほか(2019a)

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 一般的なスペクトルインバージョン解析では、観測されたフーリエ振幅スペクトルから震源スペクトル、伝播経路のQ値、地盤増幅率を推定する。
 - ・ 伝播経路のQ値は、全領域均質な減衰構造を仮定。
 - ・ 1つの基準観測点の理論増幅率で拘束。
- フーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は以下の式でモデル化。

$$F_{mn}(f) = \frac{\pi f^2 R_{\theta\phi} F_s}{\rho \beta^3} S_m(f) \frac{1}{X_{mn}} \exp\left(-\frac{\pi X_{mn} f}{Q(f) \bar{\beta}}\right) G_n(f)$$



推定するパラメータ

$S_m(f)$: m 地震の震源スペクトル

$Q(f)$: Q値 (全領域均質な減衰構造を仮定)

$G_n(f)$: n 地点の地盤増幅率

既知パラメータ

ρ : 震源媒質の密度

β : 震源媒質のS波速度

$R_{\theta\phi}$: 震源放射特性係数

F_s : 自由表面による増幅

$\bar{\beta}$: 伝播経路の平均S波速度

X_{mn} : m 地震の n 観測点への震源距離

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 本検討で用いる友澤ほか(2019b)⁷⁾のブロックインバージョン解析と一般的なスペクトルインバージョン解析との主な相違点は以下の通り。
 - ・ 伝播経路のQ値は、領域を分割・統合し、不均質な減衰構造を仮定。
 - ・ 2つの基準観測点の理論増幅率で拘束。
- フーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は以下の式でモデル化。

$$F_{mn}(f) = \frac{\pi f^2 R_{\theta\phi} F_s}{\rho \beta^3} S_m(f) \frac{1}{(X_{mn})^\gamma} \prod_{j=1}^J \exp\left(-\frac{\pi x_{mnj} f}{Q_j(f) \bar{\beta}}\right) G_n(f)$$

推定するパラメータ

$S_m(f)$: m 地震の震源スペクトル

$Q_j(f)$: j 番目の領域のQ値

$G_n(f)$: n 地点の地盤増幅率

既知パラメータ

ρ : 震源媒質の密度 (=2.7g/cm³)

β : 震源媒質のS波速度 (=3.4km/s)

$R_{\theta\phi}$: 震源放射特性係数 (=0.63)

F_s : 自由表面による増幅 (=2)

$\bar{\beta}$: 伝播経路の平均S波速度 (=3.4km/s)

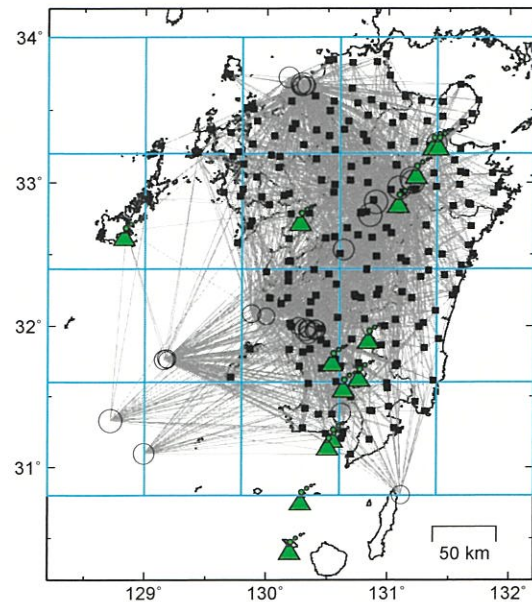
X_{mn} : m 地震の n 観測点への震源距離

x_{mnj} : j 番目の領域の伝播距離

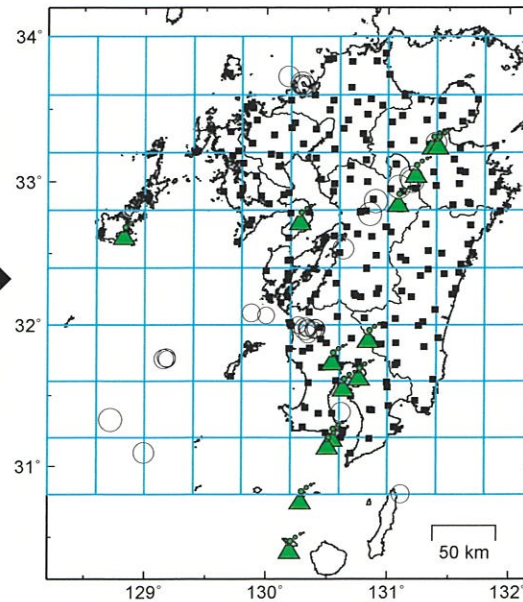
γ : 幾何減衰項

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

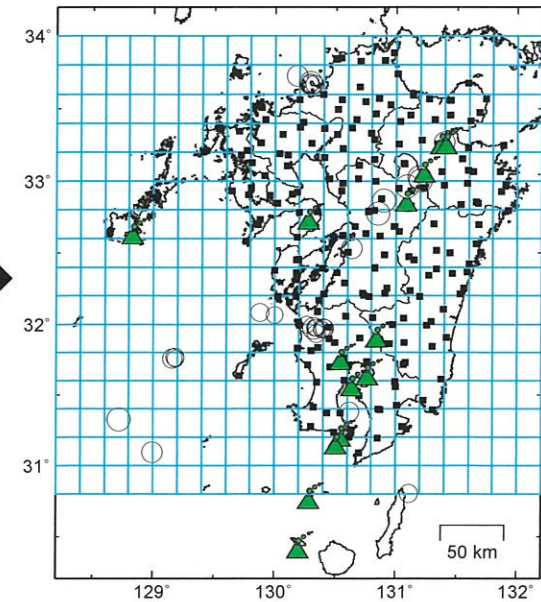
- 領域分割の推定は、まずは、ブロックサイズを大きく設定し、広域な不均質減衰構造を求め、徐々に最小ブロックサイズを小さくして、より詳細な不均質減衰構造を推定。



①初期領域分割 $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ として
最小ブロック $0.8^{\circ} \times 0.8^{\circ}$ と設定



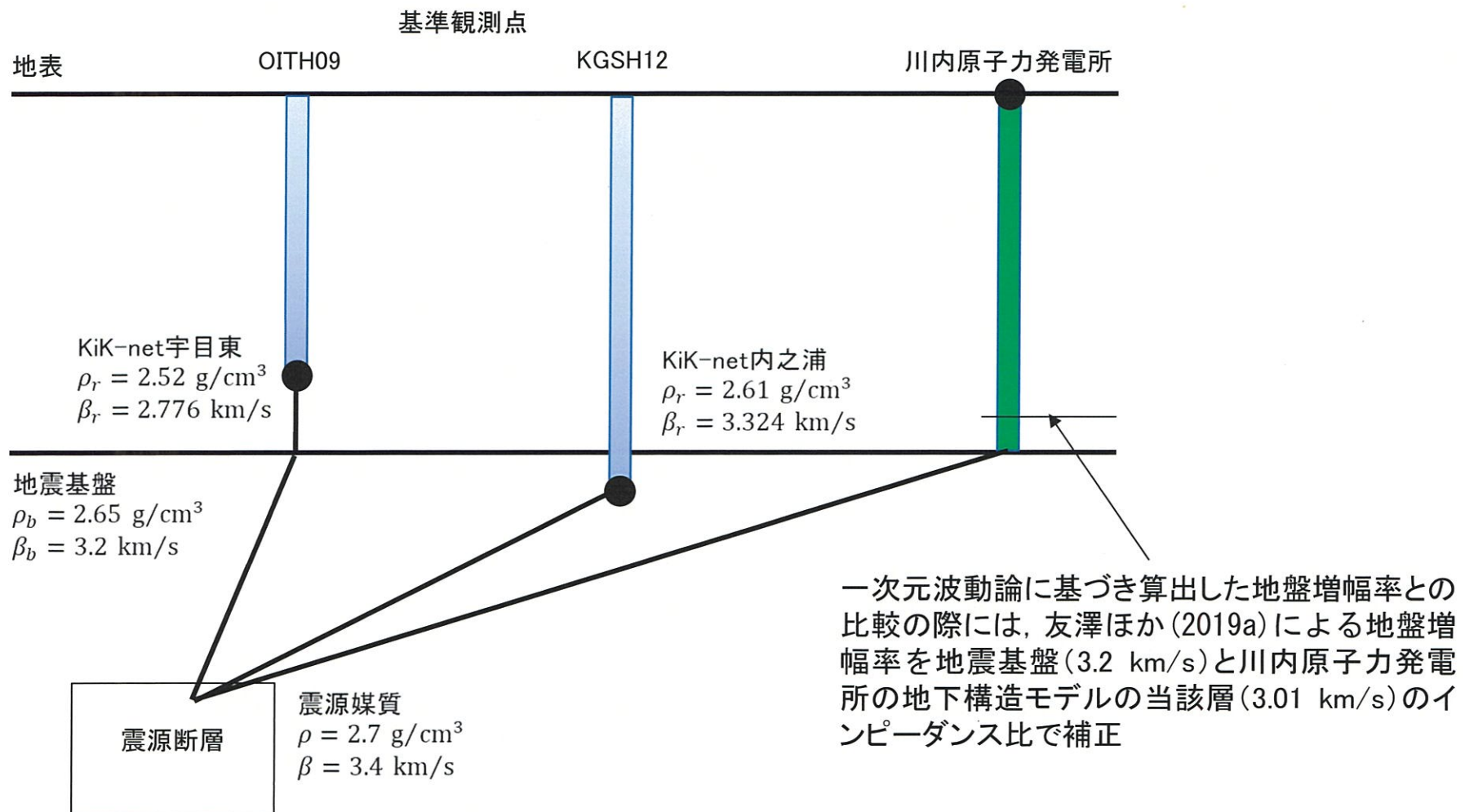
②左記の条件で推定した領域分割を初期値として
最小ブロック $0.4^{\circ} \times 0.4^{\circ}$ と設定



③左記の条件で推定した領域分割を初期値として
最小ブロック $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ と設定

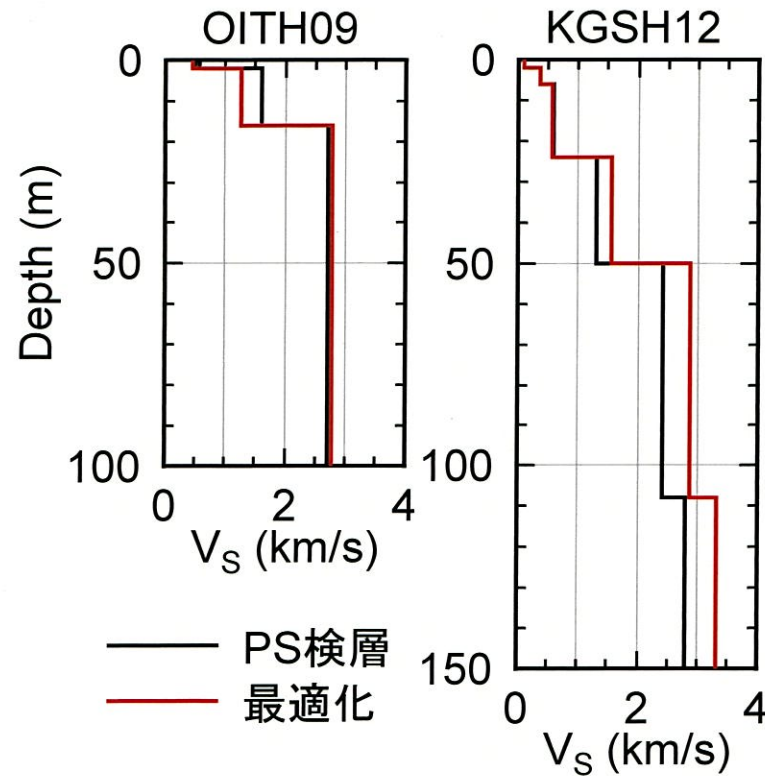
【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 友澤ほか(2019a)^{5),6)}では、KiK-net宇目東(OITH09)とKiK-net内之浦(KGSH12)の2観測点を基準観測点として選定し、その地中観測点位置の理論増幅特性 $(E+F)/2E$ を拘束条件として震源特性とサイト増幅特性のトレードオフを解消。
- 地震基盤から基準観測点の地中観測点への増幅率はインピーダンス比を考慮。

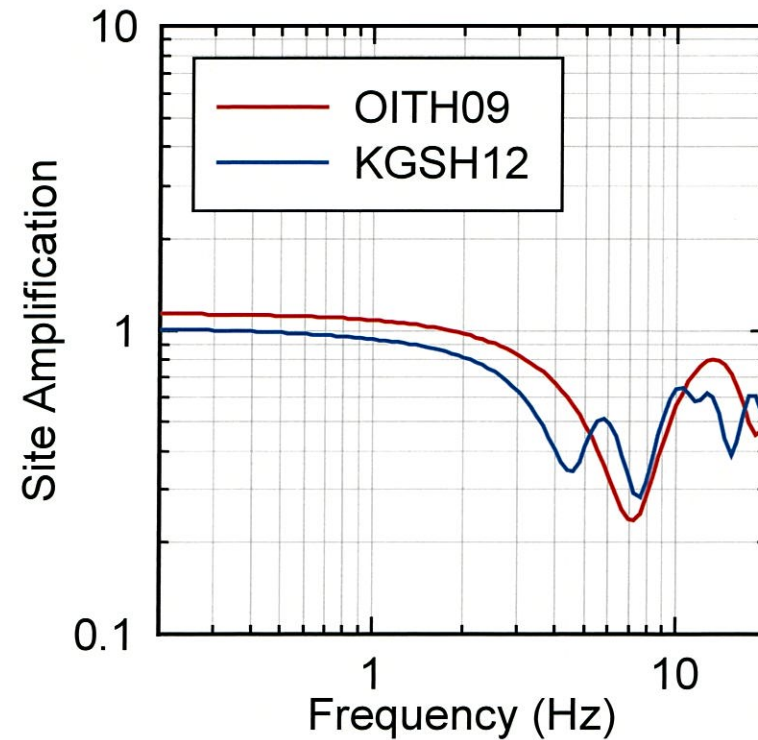


【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 笠松ほか(2014)¹³⁾の最適化地盤モデルによると、基準観測点として選定したKiK-net宇目東(OITH09)とKiK-net内之浦(KGSH12)の地中観測点位置は、地震基盤と見なせるため、基準観測点に適していると判断。
- 笠松ほか(2014)では、観測点の地表／地中の伝達関数を算定し、それに鉛直入射を仮定した一次元波動論を当てはめる逆解析に基づいて最適化を検討。



基準観測点の地盤モデル

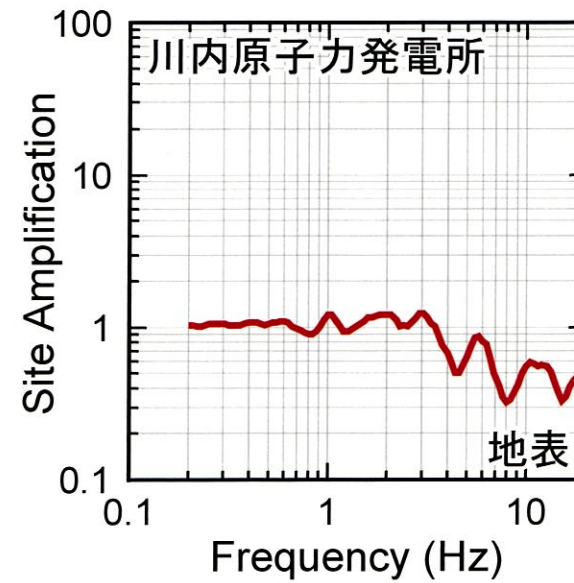
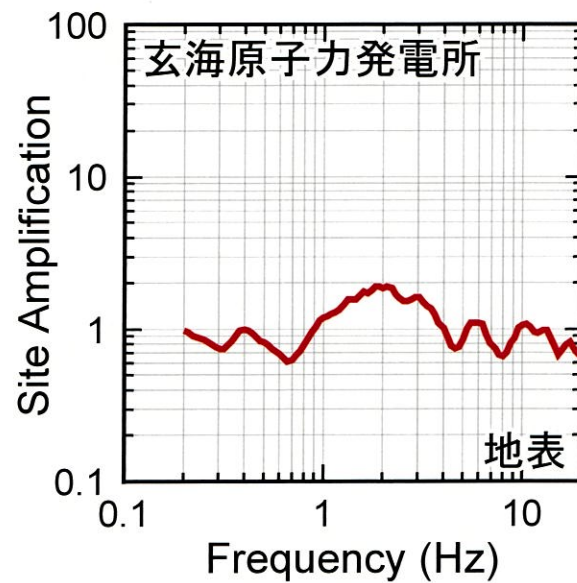


基準観測点の理論増幅率

友澤ほか(2019a)

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

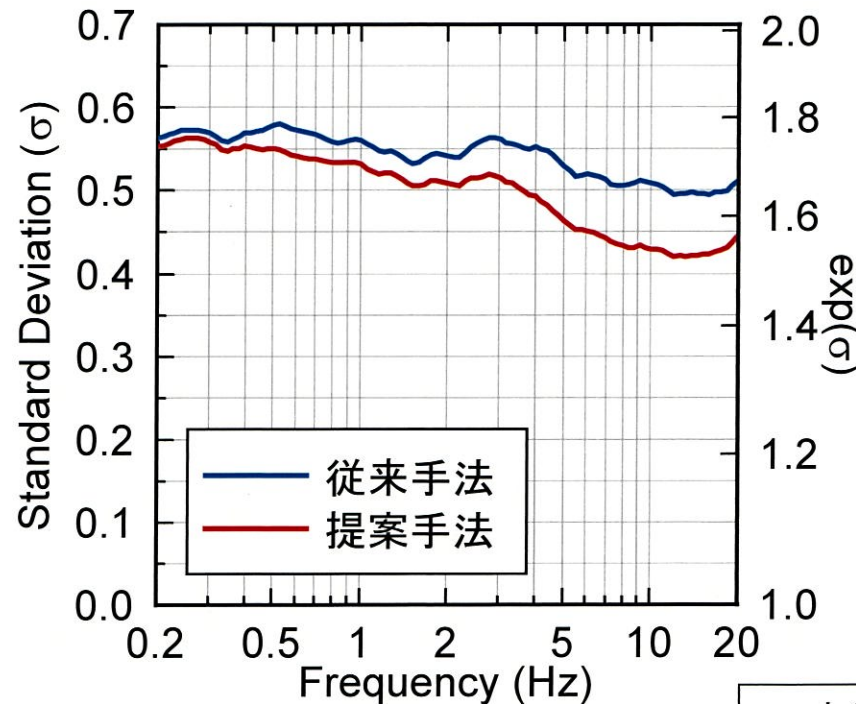
- 玄海原子力発電所及び川内原子力発電所の地表におけるサイト増幅率を推定。



友澤ほか(2019a)に加筆

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

- 全領域で均質な減衰構造を仮定してスペクトルインバージョン解析を行った場合（従来手法）と、本手法により減衰構造に不均質性を考慮した場合（提案手法）の回帰残差の標準偏差を比較。
- 伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することにより、特に高周波数側ではらつきの値が最大15%低減。



残差の標準偏差の比較

友澤ほか(2019a)

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 62頁に示す通り、川内原子力発電所の地震基盤相当面は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデルにおける $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面(EL. -480m)に設定。
- ただし、上記設定における $V_s=2150\text{m/s}$ は、設置許可基準規則解釈別記2に示される $V_s=2200\text{m/s}$ 以上を下回るため、次頁以降で、仮想的に、 $V_s=2200\text{m/s}$ の層を設定し、解放基盤表面までの地盤増幅率の検討を実施。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
解放基盤表面	-18.5m				
	0.0	2.70	1500	3200	12.5
	-28.5m				
	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
	-200m				
	-0.182	2.70	1600	3700	100
	-480m				
	-0.462	2.70	2150	4400	200
	-1018.5m				
	-1.0	2.70	3010	5200	200
	-2018.5m				
	-2.0	2.70	3240	5600	300
	-3018.5m				
	-3.0	2.70	3500	5900	300
	-17018.5m				
	-17.0	3.00	3800	6600	500
	-33018.5m				
	-33.0	3.30	4300	7600	500

▼地震基盤相当面

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

○ $V_s=2150\text{m/s}$ の層は、微動アレイの速度構造を基に設定。

第114回
審査会合資料

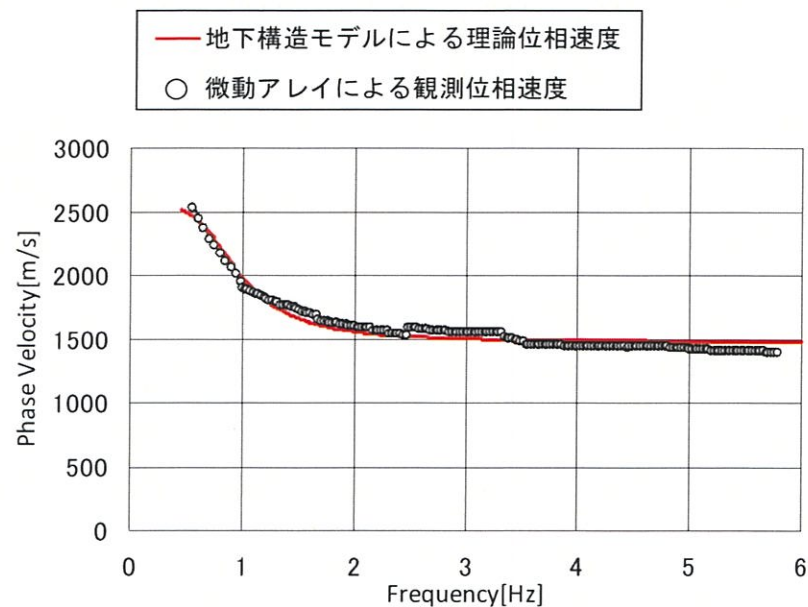
再設定した地下構造モデルと観測分散曲線の比較

■ 見直し後の地下構造モデルを基に、レイリー波の理論位相速度を算出し、微動アレイ探査結果から得られた観測位相速度と比較すると、両者はおおむね一致することを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (km/s)	V_p (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100
-480m	3	2.7	2.15	4.40	200
-1018.5m	4	2.7	3.01	5.20	200

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加



理論位相速度と観測位相速度の比較

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 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における $V_s=2150\text{m/s}$ の層 (EL.-480m~EL.-1018.5m) を2分割し、仮想的に地震基盤相当面に対応する層 ($V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4400\text{m/s}$) を設け、この層の上面の深度を変数とした再同定を実施。

	標準応答スペクトル用のモデル		
	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11.0m			
-18.5m	2.70	1500	3200
-28.5m	2.70	1500	3200
-480m	2.70	1600	3700
	2.70	2150	4400
-1018.5m	2.70	3010	5200



	再同定に用いるモデル		
	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11.0m			
-18.5m	2.70	1500	3200
-28.5m	2.70	1500	3200
-480m	2.70	1600	3700
-●m	2.70	2150	4400
-1018.5m	2.70	2200	4400
	2.70	3010	5200

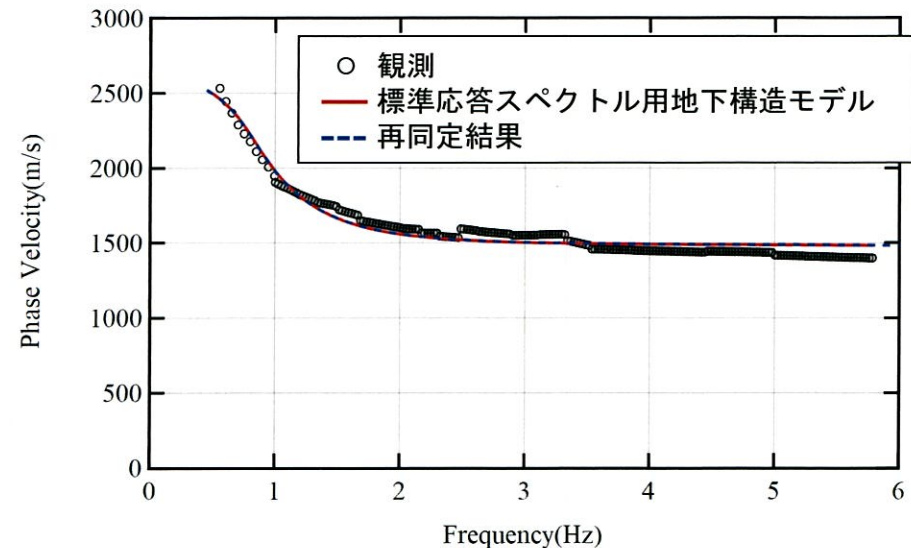
解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に層を追加

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 仮想的に、地震基盤相当面に対応する層 ($V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4400\text{m/s}$) を設定し、微動アレイ観測結果に基づく再同定を実施した結果、地震基盤相当面に対応する層の上面の深度はEL. -999.5mとなった。

	再同定結果		
	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11.0m			
-18.5m	2.70	1500	3200
-28.5m	2.70	1500	3200
-480m	2.70	1600	3700
-999.5m	2.70	2150	4400
-1018.5m	2.70	2200	4400
	2.70	3010	5200

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に層を追加



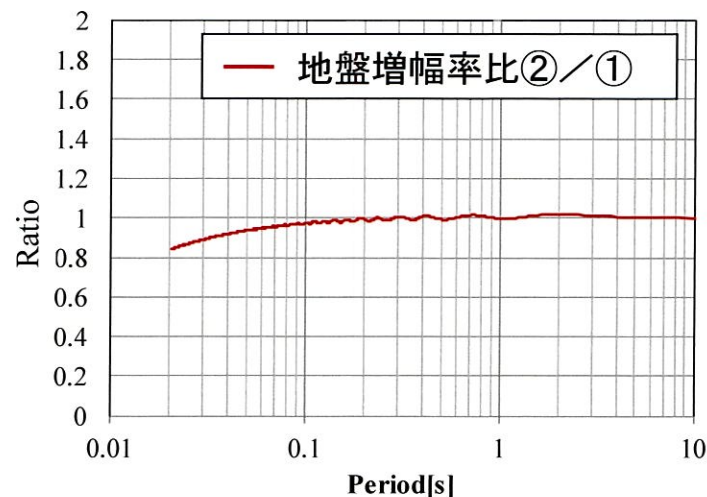
理論位相速度と観測位相速度の比較

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 前頁の検討結果を、60頁に示す標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデルに反映した仮想的な地下構造モデルを設定。
- 今回の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 $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率(①)と仮想的な地下構造モデルの $V_s=2200\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率(②)を比較した結果、短周期側では、仮想的な地下構造モデルの地盤増幅率(②)のほうが小さい傾向。
- これを踏まえ、62頁に示すとおり、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における $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面に地震基盤相当面を設定。

比較に用いる地下構造モデル

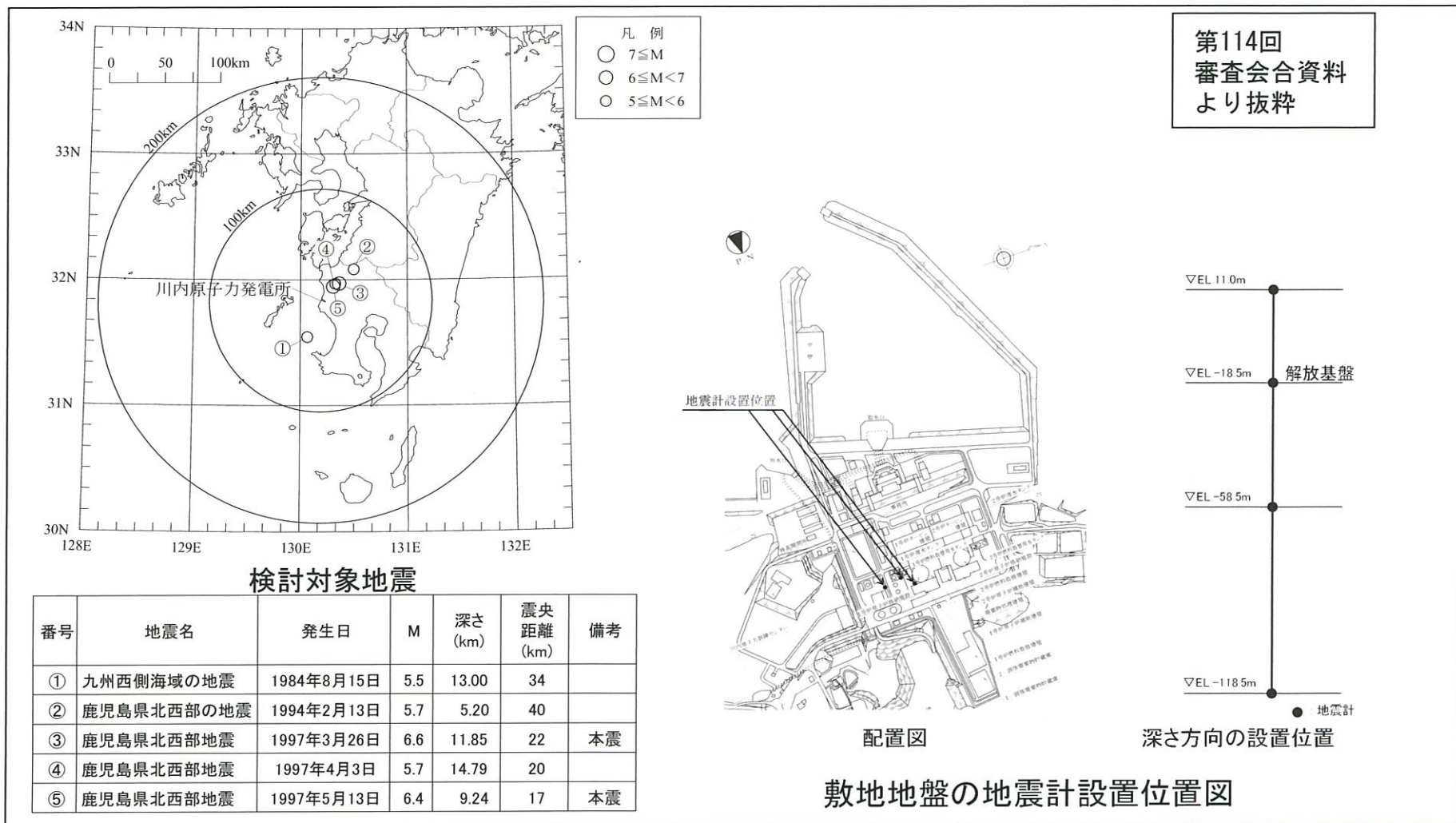
EL. (m)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
-18.5m	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m		1600	3700	12.5
-200m	2.70	1600	3700	100
-480m		2150	4400	200
-999.5m	2.70	2200	4400	200
-1018.5m		3010	5200	200



地盤増幅率の比較

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

- 既許可時審査の地下構造モデルの検討では、Noda et al. (2002)¹⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震（5地震）を対象とし、鉛直アレイ観測記録の伝達関数による地盤同定を実施。



【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

第114回
審査会合資料

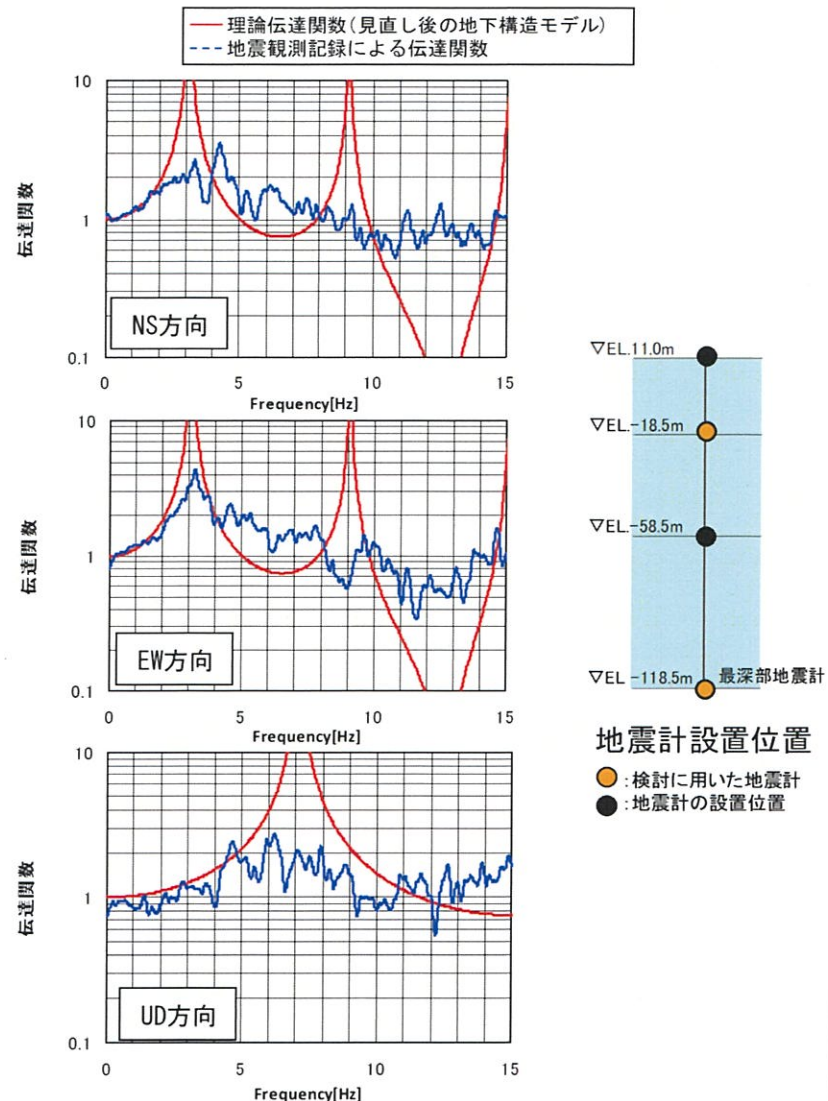
再設定した地下構造モデルと鉛直アレイ地震観測記録による伝達関数の比較

■ 見直し後の地下構造モデルから算出した伝達関数は、鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数及び地震観測記録から同定された地下構造による理論伝達関数とほぼ整合していることを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (km/s)	V_p (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加



伝達関数の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

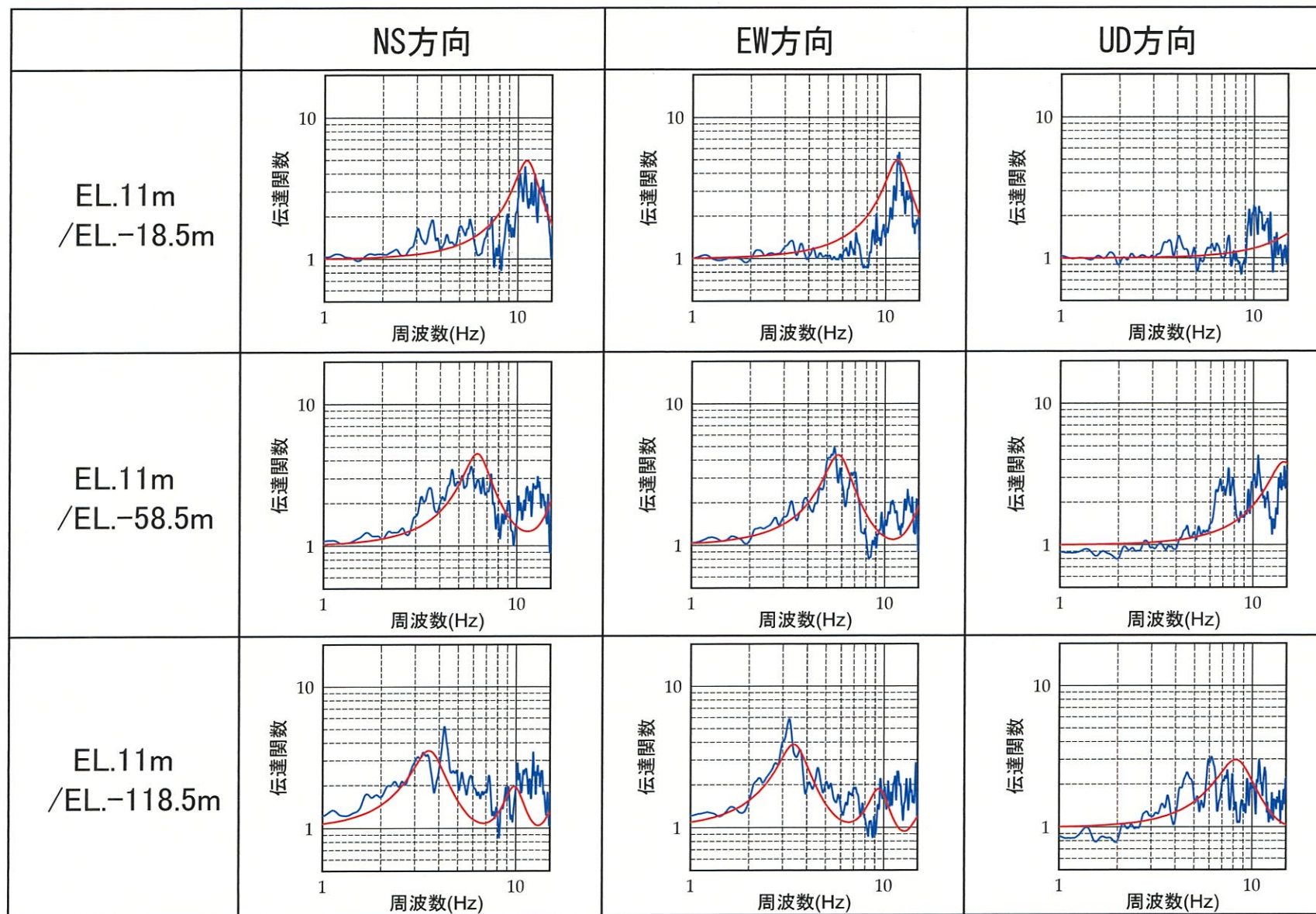
伝達関数による地盤減衰の同定における解析条件（既許可時審査）

項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	5地震
ターゲットとする観測伝達関数	5地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) <ul style="list-style-type: none"> ・EL.11.0m/EL.-18.5m ・EL.11.0m/EL.-58.5m ・EL.11.0m/EL.-118.5m 観測記録全区間を使用 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚は各地震計観測点の距離、密度は 2.70g/cm^3 とし、 S波速度 V_s 、P波速度 V_p 、地盤減衰(Q値)を同定
Q値	$Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

伝達関数の比較（既許可時審査）

— 地震観測記録(5地震)
— 既許可時同定結果 ($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)



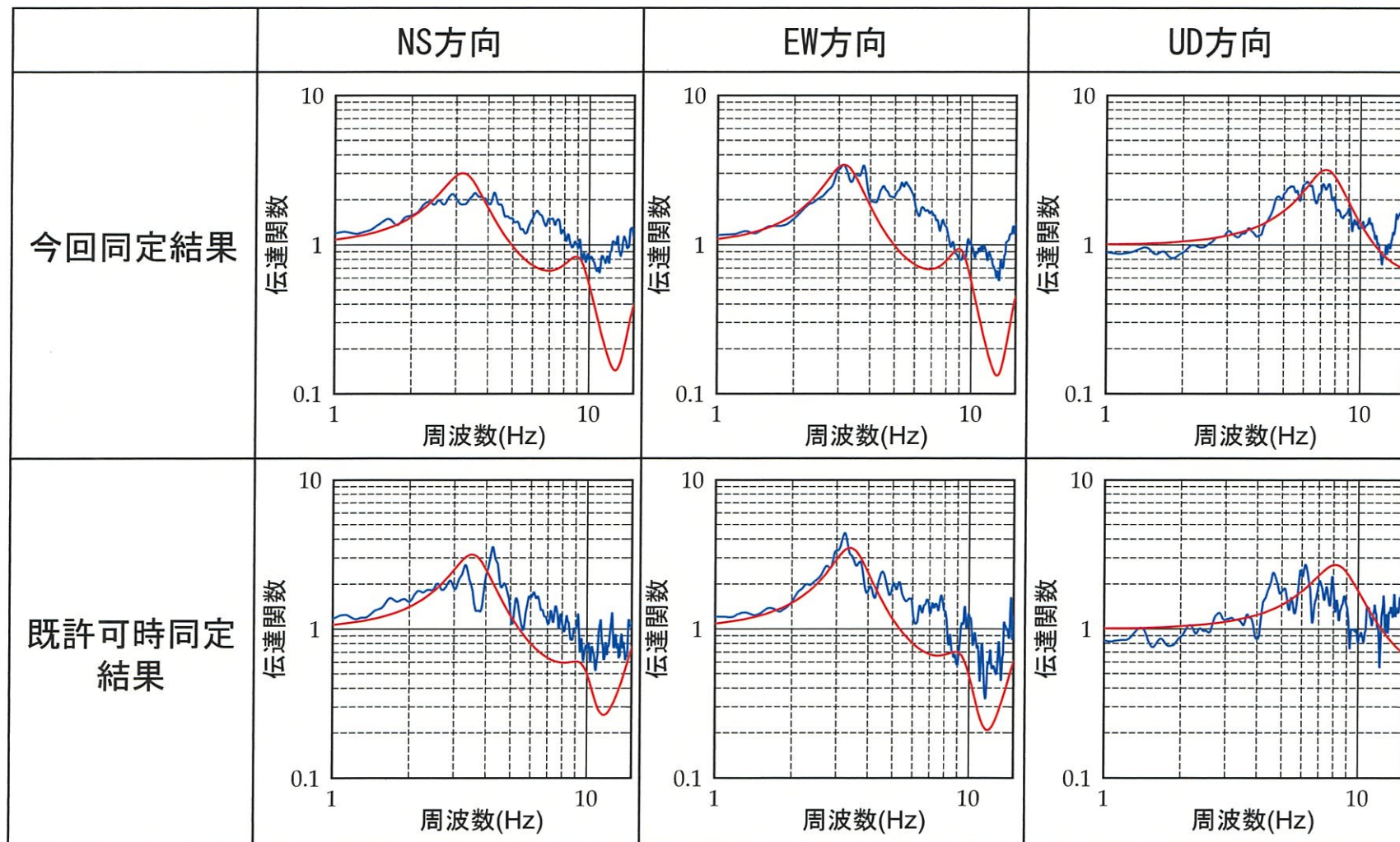
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

地盤減衰の同定結果の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

- 既許可時審査の同定結果は、今回同定結果と比べて、理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数の整合関係に大きな差異がないことを確認。

— 地震観測記録(20地震(上段)、5地震(下段))
 — 各同定結果($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)



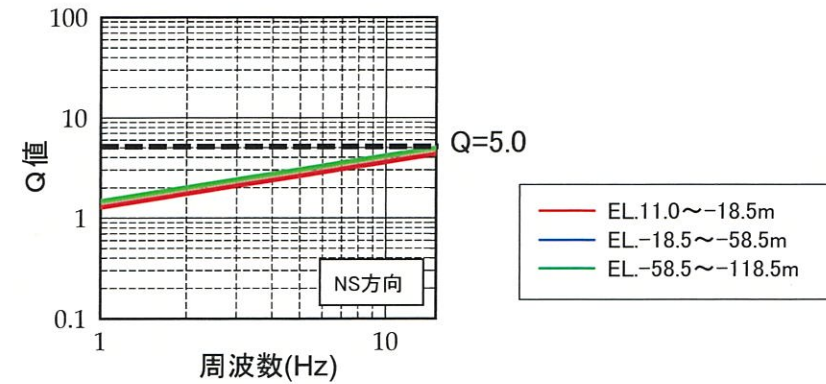
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

- 既許可時審査における地盤同定結果によると、地盤減衰（Q値）の下限はQ=5.0程度であり、今回の同定結果（Q=5.9程度）より小さいことを確認。

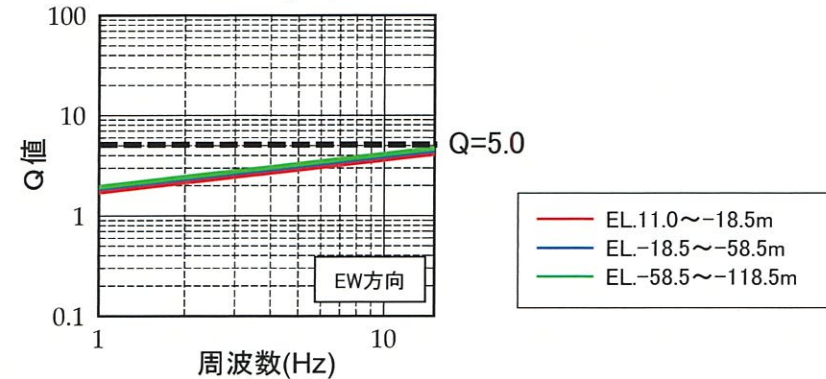
【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	1293	1.29	0.45
-18.5	2.70	1779	1.47	0.45
-58.5	2.70	1798	1.47	0.45



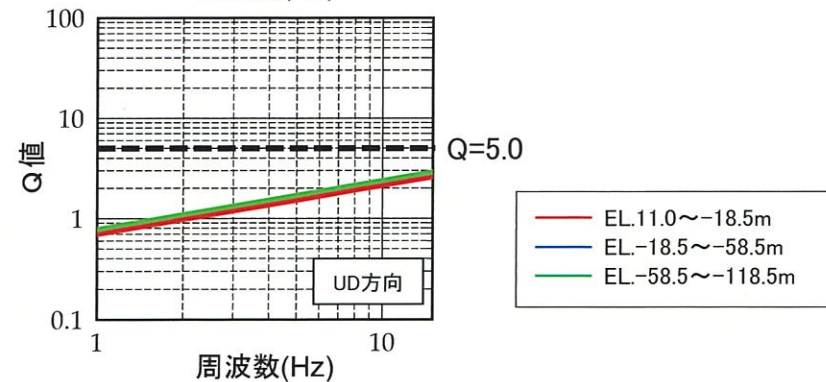
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	1341	1.73	0.32
-18.5	2.70	1603	1.85	0.32
-58.5	2.70	1779	1.93	0.32



【UD方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	3046	0.70	0.48
-18.5	2.70	4074	0.78	0.48
-58.5	2.70	4108	0.78	0.48



$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$

参考文献

- 1) 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-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct. 16-18, pp.399-408.
- 2) R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura (2016): Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 552-559.
- 3) Riga, Evi, F. Hollender, A. Roumelioti, P.-Y. Bard, and K. Pitilakis (2019): Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No.2, pp. 621-635.
- 4) John G. ANDERSON(2004): QUANTITATIVE MEASURE OF THE GOODNESS-OF-FIT OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 243, August 1-6, 2004.
- 5) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定、(その1)ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、21238、2019年9月。
- 6) 中尾隆、本村一成、赤司二郎、友澤裕介、加藤研一(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定、(その2)距離減衰特性の方位性、サイト増幅特性、震源特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、21239、2019年9月。
- 7) 友澤裕介、加藤研一、野尻揮一郎(2019b):地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域を対象とした検討、日本建築学会構造系論文集、第84巻、第756号、171-181、2019年2月。
- 8) 友澤裕介、加藤研一、塩田哲生(2020):伊予灘周辺で発生した地震に基づく震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定-フィリピン海プレートの形状を考慮したブロックインバージョン解析-、日本地震工学会論文集、第20巻、第7号、120-132、2020年11月。
- 9) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019):全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書、令和元年8月7日。
- 10) 加藤研一、武村雅之、八代和彦(1998):強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性、地震第2輯、51巻、123-138。
- 11) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019):全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書 参考資料 標準応答スペクトルに係る検討について、令和元年8月7日。
- 12) 日本電気協会(2015):原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2015.
- 13) 笠松健太郎、池浦友則、岡崎敦(2014):KiK-net地点における応答スペクトルのはざとり倍率、日本建築学会大会学術講演梗概集、21207、2014年9月。