

# NRA 技術ノート

NRA Technical Note Series

## 震源を特定せず策定する地震動の標準応答 スペクトルの妥当性確認 —2018年から2022年の観測記録の追加—

Validation of the Standard Response Spectra of Ground Motions  
Evaluated Without Specifying Seismic Sources  
— Addition of Observation Records from 2018 to 2022 —

田島 礼子

TAJIMA Reiko

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和6年5月

May 2024

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門  
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル  
電話：03-5114-2226  
ファックス：03-5114-2236

# 震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトルの妥当性確認 —2018年から2022年の観測記録の追加—

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ  
地震・津波研究部門  
田島 礼子

## 要 旨

全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の標準応答スペクトルを規制に取り入れるために、令和3年4月21日に「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」等の一部が改正された。

標準応答スペクトルは、原子力規制委員会の「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」において、非超過確率97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトル及び各種の妥当性確認結果に基づいて、令和元年8月に策定された。この非超過確率応答スペクトルは、18年間（2000年～2017年）に全国で起きた内陸地殻内地震（Mw5.0～6.5程度）の震源近傍の地震基盤相当面における多数の記録を統計処理して求められた。

他方、同検討チームでは、標準応答スペクトルに関して中長期的に取り組むべき将来の課題についても議論された。その課題の1つとして、新たに起きた収集対象地震の観測記録を追加した解析等を行い、定期的に標準応答スペクトルへの影響確認を行うことの重要性が挙げられた。

本研究では、標準応答スペクトルを策定した従来研究の対象期間より後の5年間（2018年～2022年）に起きた地震の観測記録を、同様の条件及び手法により収集・整理した上で、解析を行った。それらの記録を従来のデータセットに追加し、23年間（2000年～2022年）のデータを用いて統計処理を行い、非超過確率別応答スペクトルを算出して、従来研究の結果と比較した。

その結果、本研究及び従来研究において算出した非超過確率別応答スペクトルは、周期1秒程度以上の長周期側では本研究の結果の方がわずかに小さいものの、ほぼ同等の結果となった。したがって、本研究における5年間の記録を追加した統計処理結果が、現行の標準応答スペクトルに与える影響はないという意味で、同スペクトルが妥当であることを確認した。

本技術ノートは、新たな観測記録を追加して統計処理結果を比較することによる標準応答スペクトルの妥当性確認に係る一連の研究について取りまとめたものである。

Validation of the Standard Response Spectra of Ground Motions Evaluated Without Specifying  
Seismic Sources

— Addition of Observation Records from 2018 to 2022 —

TAJIMA Reiko

Division of Research for Earthquake and Tsunami,  
Regulatory Standard and Research Department,  
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

In order to incorporate the standard response spectra of “ground-motions evaluated without specifying seismic sources” that shall be commonly considered throughout Japan into the regulation, a part of the Regulatory Guide of the Nuclear Regulation Authority (NRA) Rule on “Standards for the Location, Structure, and Equipment of Commercial Power Reactors” was revised on April 21, 2021.

The standard response spectra were developed by the NRA’s “study team on evaluation for ground-motions without identification of seismic sources” in August 2019, based on the response spectra corresponding to non-exceedance probability (NEP) of 97.7% (mean  $+2\sigma$ ) and the results from various validations. These NEP spectra were obtained by statistical processing using many records on the hard bedrock of inland crustal earthquakes (about Mw 5.0 to 6.5) that had occurred throughout Japan over 18 years (2000 to 2017).

On the other hand, future issues regarding the standard response spectra that should be addressed in the medium to long term were also discussed by the study team. One of the important issues identified was to add and analyze new records of target earthquakes, and to confirm the effects to the standard response spectra.

In this study, the author collected, organized, and analyzed the ground-motion records of earthquakes that occurred over five years (2018 to 2022) after the target period of the previous study for standard response spectra development, using the same conditions and method as those in the previous one. Then the author added the records to the previous data set, performed statistical processing using the 23 years (2000 to 2022) of data to calculate the NEP response spectra, and compared them with the previous ones.

As a result, the NEP response spectra calculated in this study and the previous ones were almost the same although the present ones were slightly smaller than the previous ones in the long

period range of 1 s or longer. Therefore, the author confirmed the validity of the current standard response spectra in the sense that the results of the statistical processing added five years of records in this study had no effect on them.

This technical note summarizes a series of studies related to the validation of the standard response spectra by adding new observation records and comparing the results from the statistical processing.

## 目次

1. はじめに.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 目的.....	2
2. 観測記録の収集・整理.....	4
3. はぎとり解析.....	11
3.1 解析方法.....	11
3.2 解析結果.....	13
4. 応答スペクトルの補正.....	16
4.1 補正方法.....	16
4.2 補正結果.....	22
5. 統計処理のデータセットの確認.....	29
5.1 情報の整理（ラベル付け）.....	29
5.2 確認結果.....	39
6. 統計処理による非超過確率別応答スペクトルの算出.....	55
6.1 算出ケース.....	55
6.2 算出結果.....	59
7. 従来研究の結果との比較による標準応答スペクトルへの影響確認.....	82
8. まとめ.....	97
参考文献一覧.....	98
執筆者一覧.....	100
付録1 震源距離補正の手法を変えた場合の結果との比較.....	101
付録2 群発地震の観測記録の確認.....	114

## 表 目 次

表 2.1	観測記録の追加収集条件 .....	4
表 2.2	収集した地震及び観測記録の数 .....	6
表 2.3	解析対象とした地震及び観測記録の数 .....	6
表 2.4	本研究において収集・整理した地震の一覧 .....	7
表 2.5	従来研究において収集・整理された地震の一覧（参考）（1/3） .....	8
表 3.1	設定した地盤モデルの例：KiK-net 朝日（YMTH13）観測点 .....	12
表 4.1	応答スペクトルの補正方針 .....	18
表 4.2	地盤物性補正の条件 .....	21
表 5.1	ラベル付けの項目 .....	31
表 5.2	ラベル付けによるグループ分けに基づくデータセットの地震動特性の確認結果 .....	40
表 6.1	非超過確率別応答スペクトルの算出ケース .....	57
付表 2.1	解析対象とした長野県・岐阜県境付近の群発地震及び観測記録の諸元一覧 .....	117
付表 2.2	解析対象とした石川県能登地方の群発地震及び観測記録の諸元一覧 .....	124

## 目 次

図 1.1	「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」における全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の標準応答スペクトル策定の概念図	3
図 2.1	収集条件を満たす 105 地震の震央分布（黒線：従来研究、赤線：本研究）	5
図 2.2	解析対象地震の規模（ $M_w$ ）別の頻度分布	6
図 3.1	地中地震計より上の表層地盤の影響を取り除くための「はぎとり解析」の概念図	11
図 3.2	PS 検層結果の例：KiK-net 朝日（YMTH13）観測点	12
図 3.3	はぎとり波の算出例：2019 年 6 月 18 日山形県沖の地震（ $M_w6.4$ ）の KiK-net 朝日（YMTH13）観測点の記録（断層最短距離：28.9 km、地中地震計深度：104 m、地中地震計位置の $V_s$ ：1630 m/s、 $V_p$ ：3820m/s）	14
図 3.4	はぎとり解析における減衰定数（ $h$ ）の調整の例：2019 年 6 月 18 日山形県沖の地震の KiK-net 朝日（YMTH13）観測点の記録	15
図 4.1	震源距離補正の概念図	18
図 4.2	断層上端深さと震源距離補正の方針の対応関係	19
図 4.3	補正前の震源距離の推定に用いる震源（面断層又は点震源）の設定手順	20
図 4.4	地盤物性補正の概念図	21
図 4.5	補正前の水平動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）	23
図 4.6	補正後の水平動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）	24
図 4.7	補正前の上下動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）	25
図 4.8	補正後の上下動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）	26
図 4.9	補正前後の水平動の平均スペクトル及び標準偏差の比較	27
図 4.10	補正前後の上下動の平均スペクトル及び標準偏差の比較	28
図 5.1	震源深さのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布	32
図 5.2	地震発生地域のグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布	32
図 5.3	断層タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布	33
図 5.4	地震活動タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布	33
図 5.5	最寄り活断層からの距離の算出例	34
図 5.6	解析対象記録の震源と観測点の最短距離（補正前）別の頻度分布	35
図 5.7	解析対象記録の地中地震計位置の $V_s$ 別の頻度分布	36
図 5.8	解析対象記録の地中地震計位置における地震基盤深さ別の頻度分布	37

図 5.9	「⑩ 特徴的な地震動」のラベル付けの流れ .....	38
図 5.10	「① 地震規模 (Mw)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	43
図 5.11	「② 震源深さ」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	44
図 5.12	「③ 地震活動地域 (西日本、東日本)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	45
図 5.13	「④ 断層タイプ (横ずれ断層、逆断層、正断層)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	46
図 5.14	「⑤ 地震活動タイプ (前震、本震、余震)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	47
図 5.15	「⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 (活断層のみ)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	48
図 5.16	「⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 (活断層又は推定活断層)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	49
図 5.17	「⑦ 補正前の震源と観測点の最短距離」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	50
図 5.18	「⑧ 地中地震計位置の地盤の $V_s$ 」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	51
図 5.19	「⑨ 地中地震計位置での地震基盤深さ」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	52
図 5.20	「⑩ 統計処理に用いる地震の数」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	53
図 5.21	「⑩ 特徴的な地震動」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較 .....	54
図 6.1	G-R 則に従うことを想定した場合の地震・記録の規模別頻度分布 (ケース 3) .....	58
図 6.2	疑似速度応答スペクトルからなるデータセット (左) に基づく周期 $T_i$ における地震動強さ (疑似速度応答) の確率密度関数 (右) 算出の概念図 .....	59
図 6.3	非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 1 (全データ、補正あり) .....	60
図 6.4	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較 : ケース 1 .....	61
図 6.5	非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 1'a (全データ、補正なし) .....	62
図 6.6	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較 : ケース 1'a .....	63

図 6.7	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相対 頻度（下段）：ケース 1'b（全データ、地盤物性補正のみ） .....	64
図 6.8	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 1'b.....	65
図 6.9	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相対 頻度（下段）：ケース 2（Mw6.5 未満） .....	66
図 6.10	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 2 .....	67
図 6.11	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 3（G-R 則想定のみ） .....	68
図 6.12	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 3 .....	69
図 6.13	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 4a（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含む グループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0.5, D=0）） .....	70
図 6.14	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 4a.....	71
図 6.15	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 4b（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含む グループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0, D=0）） .....	72
図 6.16	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 4b .....	73
図 6.17	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 5（Vs 2000 m/s 以上の地盤におけるデータのみ） .....	74
図 6.18	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 5 .....	75
図 6.19	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 2'a（Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因 による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0.5, D=0）） .....	76
図 6.20	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 2'a.....	77
図 6.21	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相 対頻度（下段）：ケース 2'b（Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因 による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0, D=0）） .....	78
図 6.22	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケ ース 2'b.....	79

図 6.23	非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度（下段）：ケース 4'（全データ、地中観測記録の 2 倍）	80
図 6.24	代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 4'	81
図 7.1	地震基盤相当面（ $V_s=2200$ m/s 以上）における標準応答スペクトルのコントロールポイント	83
図 7.2	検討チームにおいて算出された非超過確率 97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトル及び策定された標準応答スペクトル（従来研究の結果）	84
図 7.3	検討チームによる非超過確率別応答スペクトルの算出例：ケース 2（Mw6.5 未満）とケース 1（全データ）の比較（従来研究の結果）	85
図 7.4	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1（全データ、補正あり）	86
図 7.5	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1'a（全データ、補正なし）	87
図 7.6	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1'b（全データ、地盤物性のみ補正）	88
図 7.7	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2（Mw6.5 未満）	89
図 7.8	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 3（G-R 則想定のみ付け）	90
図 7.9	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4a（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0.5, D=0））	91
図 7.10	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4b（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0, D=0））	92
図 7.11	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 5（ $V_s$ 2000 m/s 以上の地盤におけるデータのみ）	93
図 7.12	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'a（Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0.5, D=0））	94
図 7.13	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'b（Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0, D=0））	95
図 7.14	本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4'（地中観測記録の 2 倍）	96

付図 1.1	方法 B (試行) による震源距離補正の例.....	103
付図 1.2	補正前後の最短距離別の頻度分布及び累積相対頻度 (水平動の例) .....	104
付図 1.3	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1 (全データ、補正あり) .....	105
付図 1.4	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2 (Mw6.5 未満) .....	106
付図 1.5	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 3 (G-R 則想定) の重み付け) .....	107
付図 1.6	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4a (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0) ) .....	108
付図 1.7	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4b (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) ) .....	109
付図 1.8	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 5 (Vs 2000 m/s 以上の地盤におけるデータのみ) .....	110
付図 1.9	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'a (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0) ) .....	111
付図 1.10	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'b (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) ) .....	112
付図 1.11	震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4' (地中観測記録の 2 倍) .....	113
付図 2.1	解析対象とした長野県・岐阜県境付近の群発地震の震央分布.....	116
付図 2.2	群発地震 (2020 年 4 月 23 日 長野・岐阜県境付近の地震：No. 97、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較.....	118
付図 2.3	群発地震 (2020 年 5 月 19 日 長野・岐阜県境付近の地震：No. 98、Mw5.2) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較.....	119
付図 2.4	群発地震 (2020 年 5 月 29 日 長野・岐阜県境付近の地震：No. 99、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較.....	120
付図 2.5	群発地震 (2021 年 9 月 19 日 長岐岐阜県飛騨地方：No. 101、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較 .....	121
付図 2.6	長野県・岐阜県境付近の群発地震及びその他の地震のはぎとり波の応答スペクトルの比較 .....	122

付図 2.7	解析対象とした石川県能登地方の群発地震の震央分布 .....	123
付図 2.8	群発地震（2021年9月16日石川県能登地方の地震：No. 100、Mw5.0）の地表 観測記録及び距離減衰式による推定値の比較 .....	125
付図 2.9	群発地震（2022年6月19日石川県能登地方の地震：No. 104、Mw5.2）の地表 観測記録及び距離減衰式による推定値の比較 .....	126
付図 2.10	石川県能登地方の群発地震及びその他の地震のはざとり波の応答スペクトル の比較 .....	127

## 用語の定義

応答スペクトル	地震動の時刻歴波形に対して、様々な固有周期 (T) を有する 1 自由度系の応答 (減衰定数は一定) を計算し、その応答の最大値を縦軸に、T を横軸にとったグラフで表したものをいう。応答スペクトルには、応答の時刻歴波形のタイプによって、変位応答スペクトル (Sd)、速度応答スペクトル (Sv) 及び加速度応答スペクトル (Sa) の 3 種類がある。
擬似速度— 応答スペクトル	近似式 ( $S_v = S_a \times T/2\pi$ ) を用いて $S_a$ から換算した $S_v$ を擬似速度応答スペクトル (pSv) という。
距離減衰式	地震の揺れの強さについて地震規模、震源からの距離等との関係式として表したものであり、「地震動予測式」又は「地震動モデル」とも呼ばれる。
地震基盤	地震波が地盤の影響を大きく受けないせん断波 (S 波) 速度 ( $V_s$ ) が 3000 m/s 程度以上の地層をいう。
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をいう。本研究では $V_s$ 2200 m/s 以上の地層とする。
重複反射理論	地震波が基盤とその上部の地表層との境界面及び地表面で反射と透過を繰り返す現象を利用し、鉛直下方から入射する任意の波動 (平面波) から地盤の振動 (応答) を解く理論をいう。
震源を特定せず— 策定する地震動	敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、敷地近傍における詳細な調査の結果にかかわらず考慮すべき地震動をいう。この地震動には、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震動」の 2 種類がある。
内陸地殻内地震	陸のプレートの上部地殻地震発生層に生じる地震をいい、海岸のやや沖合で起こるものを含む。
はぎとり解析	地中に設置された地震計よりも上の地盤をモデル化し、その影響を解析的に除去して露頭面での地震動 (露頭波) を算出する解析をいう。
PS 検層	地下のボーリング孔の内部に測定器を挿入し、P 波・S 波の速度分布状況を求めることにより、地盤特性を把握する物理探査のこ

非超過確率	<p>とをいう。</p> <p>超過確率はある大きさを超える確率であることに對し、非超過確率はある大きさを超えない確率をいう（例えば、超過確率が10%の場合、非超過確率は90%となる）。本研究では、地震動の大きさの指標として応答スペクトルを對象とし、周期ごとに求めた幾何平均と標準偏差を用いて、統計モデルとして対数正規分布を仮定して確率密度分布を求め、非超過確率ごとの応答スペクトルを算出している。</p>
標準応答スペクトル	<p>原子力規制委員会が設置した「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」において、「震源を特定せず策定する地震動」の「全国共通に考慮すべき地震動」（Mw6.5程度未満の地震）を對象に、震源近傍の多数の地震動記録に基づいて地震基盤相当面において策定した標準的な応答スペクトルをいう。</p>

## 1. はじめに

### 1.1 背景

「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<sup>(注1)</sup>（以下「規則解釈」という。）では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」に基づき基準地震動を策定することを求めている<sup>1</sup>。

「震源を特定せず策定する地震動」については、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内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し、その中で、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震動」の2種類を検討対象とすることを求めている。

「震源を特定せず策定する地震動」の「全国共通に考慮すべき地震動」については、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下「審査ガイド」という。）において、地表地震断層が出現しない可能性があるモーメントマグニチュード（Mw）6.5程度未満の地震を検討対象として適切に選定することとしている<sup>2</sup>。このような地震は、断層破壊領域が地震発生層の内部にとどまり、国内においてどこでも発生すると考えられ、震源の位置及び規模が推定できない地震として地震学的検討から「全国共通に考慮すべき地震」とされている。

令和3年の規則解釈の改正前の過去の新規制基準適合性審査においては、原子力規制委員会は、2004年北海道留萌支庁南部地震の観測記録から推定された基盤地震動<sup>3</sup>に不確かさを考慮した地震動を、全国共通に考慮する「震源を特定せず策定する地震動」として策定することを妥当と判断してきた。一方で、事業者は、過去の審査において今後取り組むべき中長期課題として整理したその他の検討対象地震の観測記録に係る地盤調査等に時間を要していた。このような状況を鑑みて、原子力規制委員会は、全国共通に適用できる地震動の策定方法（標準的な応答スペクトルの提示も含む）を明確にすることが望ましいと考え、平成29年11月29日に「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」という。）を設け、所要の検討を実施した<sup>4</sup>。

検討チームでは、平成30年1月25日から令和元年8月7日までに11回の会合が実施された<sup>5</sup>。その中で、2000年から2017年までの18年間に全国で起きたMw5.0～6.6の内陸地殻内地震の多数の観測記録を収集し、はざとり解析及び補正処理を施し、地域的な特徴を極力低減させた地震基盤相当面における震源近傍の多数の地震動記録に対して統計処理を行った。統計処理により算出した非超過確率97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトル及び各

---

(注1) 「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」、「研究開発段階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」、「再処理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」、「加工施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」、「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」、「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」及び「廃棄物管理施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」の7つの解釈をいう。

種の妥当性確認結果に基づき、標準応答スペクトルが策定された（図 1.1）<sup>6</sup>。令和 3 年 4 月 21 日には、策定した標準応答スペクトルを規制に取り入れるために、規則解釈及び審査ガイドの一部が改正された<sup>7</sup>。

他方、検討チームでは、標準応答スペクトルに係る技術的な課題（データの蓄積、はぎとり解析・補正処理の精度向上等）についても議論され、原子力規制庁長官官房技術基盤グループの安全研究において中長期的に課題に取り組むべきとの整理がなされた。特に、本技術ノートに係る課題としては、標準応答スペクトル策定では日本国内の内陸地殻内地震を対象としたが、国立研究開発法人防災科学技術研究所の KiK-net 観測点<sup>8</sup>（注2）の地中地震計の記録を収集対象としているため、2000 年以降の 18 年間の記録に限られることが挙げられ、新たに起きた地震の観測記録の収集・分析を継続的に行うことが重要とされた。

## 1.2 目的

前述のとおり、検討チームでは、新たに起きた収集対象地震の観測記録を継続的に収集・分析し、標準応答スペクトルへの影響を定期的に確認することが重要な課題の 1 つとして挙げられた。

このことを踏まえ、規制に取り入れられた標準応答スペクトルの妥当性確認に資する知見を蓄積することを目的に、検討チーム終了後の令和元年度から令和 5 年度までに、以下の安全研究プロジェクトにおいて、新たに起きた地震の観測記録を追加した解析等を行った。

- ・地震ハザード評価の信頼性向上に関する研究（平成 29 年度～令和元年度）のうち「震源を特定せず策定する地震動の検討」
- ・震源近傍の地震ハザード評価手法の高度化に関する研究（令和 2 年度～令和 5 年度）のうち「震源を特定せず策定する地震動の精度向上に係る検討」

本研究では、検討チームにおける標準応答スペクトル策定に係る一連の研究（以下「従来研究」という。）と同様の条件及び手法<sup>6,9</sup>により、従来対象とした 18 年間（2000 年～2017 年）より後の 5 年間（2018 年～2022 年）に起きた地震の観測記録を収集・解析し、さらに、それらの記録を追加した 23 年間（2000 年～2022 年）のデータを用いて統計処理を行い、その結果を従来研究の結果と比較することにより、標準応答スペクトルの妥当性の確認を行うことを目的とする。

---

（注2）KiK-net（Kiban Kyoshin Network：基盤強震観測網）は、国立研究開発法人防災科学技術研究所により整備・運用されている強震観測網のひとつである。観測施設は、高感度地震観測網（Hi-net）に併設されるかたちで、全国約 700 箇所に配置され、各観測施設には観測用の井戸（観測井）が掘削されており、地表と地中（井戸底）の双方に強震計が設置され、鉛直アレーを構成している。

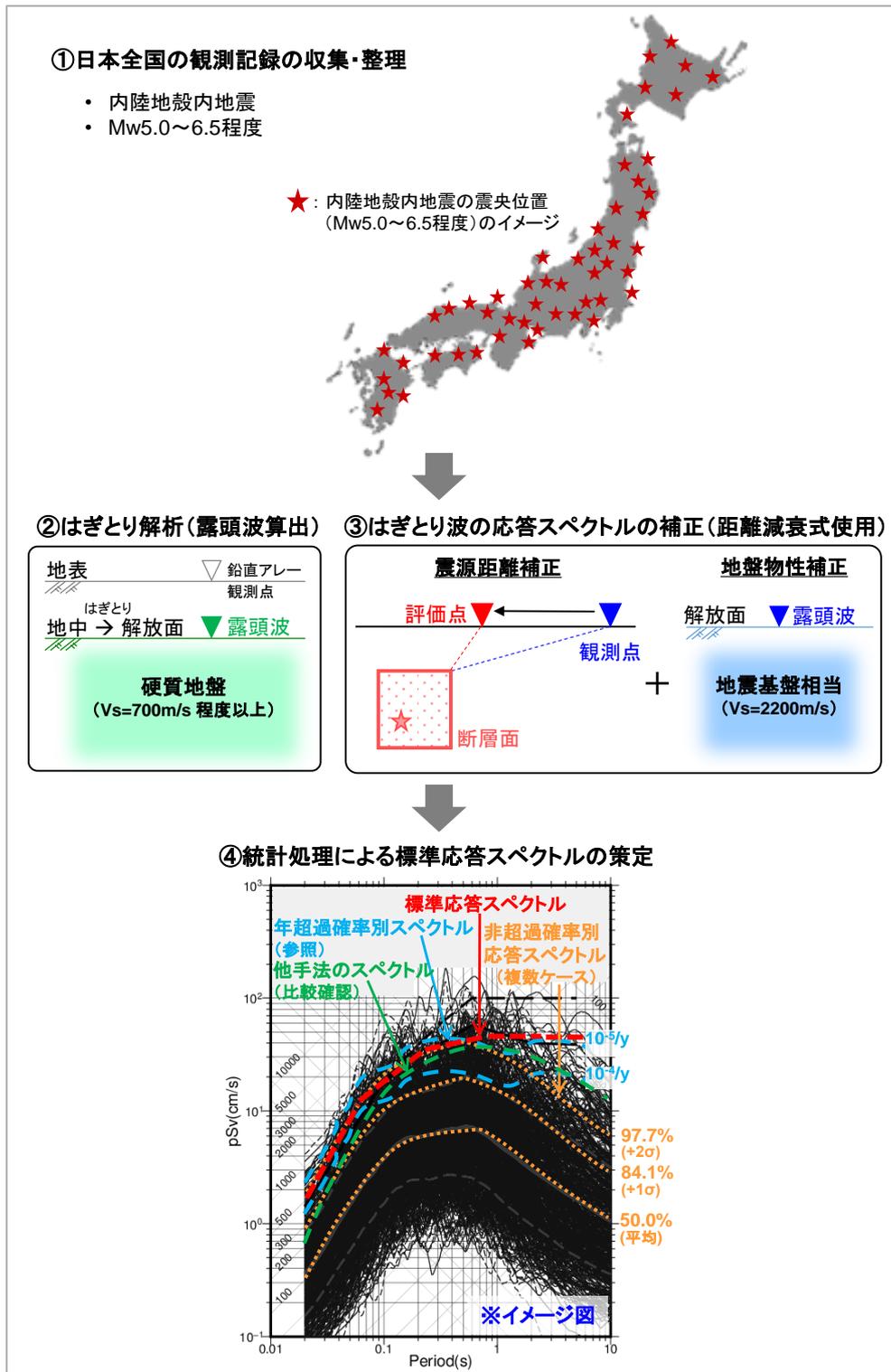


図 1.1 「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」における全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の標準応答スペクトル策定の概念図

Figure 1.1 Conceptual diagram of formulating the standard response spectra by the NRA “study team on evaluation for ground motions without identification of seismic sources” for “ground motions evaluated without specifying seismic sources” that shall be commonly considered throughout Japan

## 2. 観測記録の収集・整理

審査ガイドでは、「震源を特定せず策定する地震動」の「全国共通に考慮すべき地震動」の検討においては、Mw6.5 程度未満の「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」のうち、震源近傍において地震動が観測された地震を検討対象として選定することとしている。

本研究では、表 2.1 に示す条件で、従来研究の収集対象期間（2000 年～2017 年）より後の 2018 年～2022 年の 5 年間に日本全国で起きた Mw5.0～6.6 の内陸地殻内地震を対象に、硬質地盤（Vs 500 m/s 程度以上）に設置された KiK-net 観測点の地中地震計における震央距離 30 km 以内の観測記録を収集した。収集条件は期間を除いて従来研究と同様である。図 2.1 に収集条件を満たす地震の震央分布を、表 2.2 に収集した地震及び観測記録の数を示す。

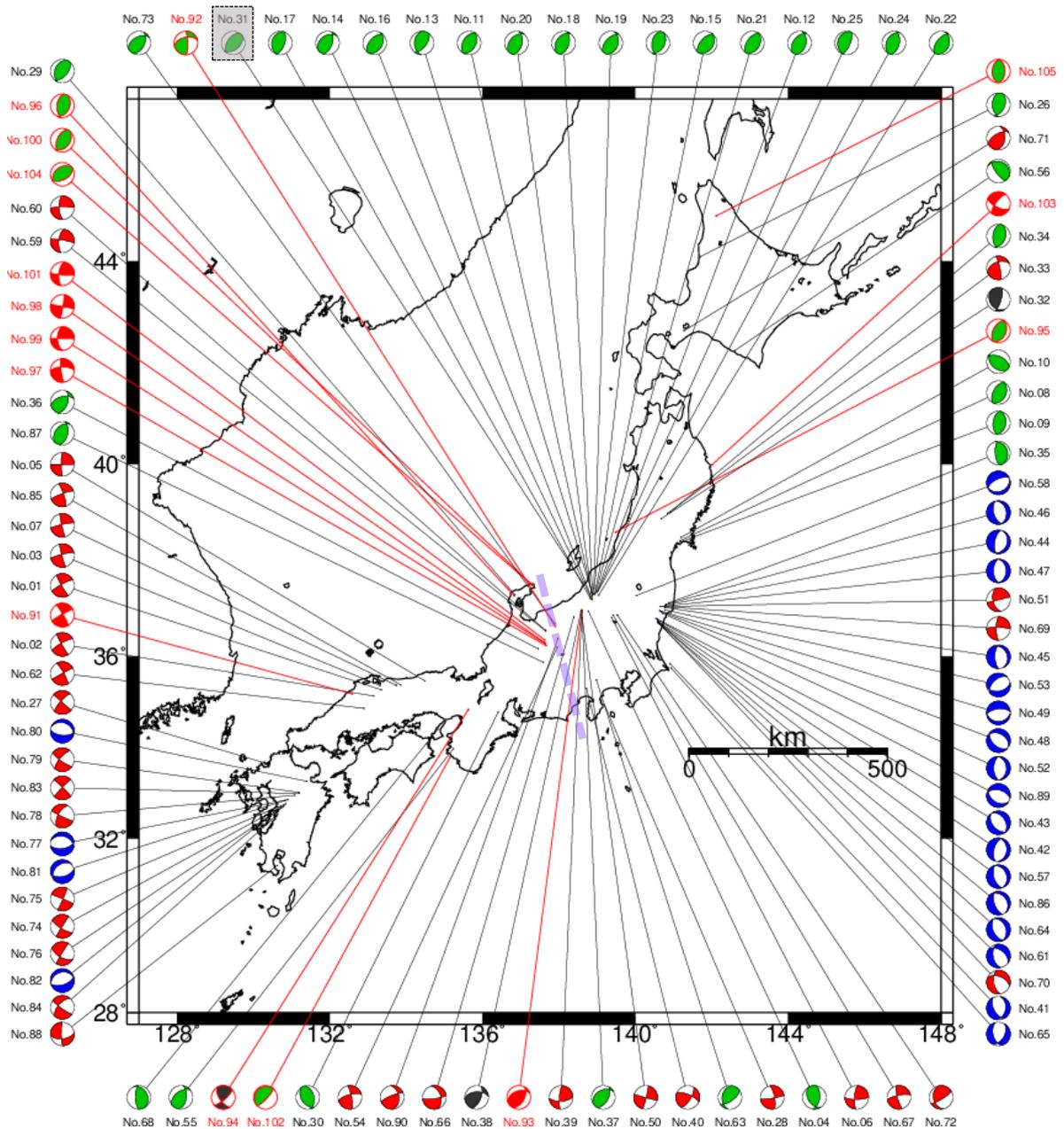
さらに、収集した観測記録について、従来研究と同様に、観測点設置方位の適正化、地表・地中観測記録の比較によるデータの品質確認を行った上で、観測波形の主要動部分の切り出し（トリミング）を行い、以降の解析に用いる記録を整理した。解析対象とした地震及び観測記録の数を表 2.3 に、解析対象地震の規模別頻度分布を図 2.2 に示す。また、本研究において収集・整理した地震情報の一覧を表 2.4 に示す。参考として、従来研究において収集・整理した地震情報の一覧を表 2.5 に示す。なお、これらの表における「地震の特性」の情報は 5.1 におけるラベル付けによる整理結果である。また、本研究の統計処理では、従来研究で採用した 89 地震の観測記録に、本研究で整理した 15 地震の記録を追加した計 104 地震の記録からなるデータセットを使用した。

表 2.1 観測記録の追加収集条件

Table 2.1 Additional collection conditions of observation records

	条 件
期間	2018 年 1 月～2022 年 12 月の 5 年間 (従来研究は 2000 年～2017 年の 18 年間)
地震規模	Mw5.0～6.6 (国立研究開発法人防災科学技術研究所の F-net <sup>10</sup> の震源メカニズム情報を参照)
震源深さ	20 km 以浅 (気象庁一元化震源カタログ <sup>11</sup> を参照)
観測記録	震央距離 30km 以内の KiK-net 観測点 <sup>8</sup> における地中地震計の地震動観測記録 (NS・EW・UD 成分) (地表地震計の記録もデータの品質確認、はざとり解析過程等で使用)

注) 期間以外の条件は検討チームにおける標準応答スペクトル策定に係る研究（従来研究）と同様



赤:横ずれ断層 緑:逆断層 青:正断層 黒:判断が難しい  
 薄紫の破線:糸魚川-静岡構造線の概略位置

※震源メカニズム解と地図を結ぶ線の先が地震の震央位置に対応  
 ※No.は表 2.4 及び表 2.5 の「地震 No.」に対応

図 2.1 収集条件を満たす 105 地震の震央分布 (黒線: 従来研究、赤線: 本研究)  
 Figure 2.1 Epicentral distribution of 105 earthquakes satisfying the collection conditions (Black lines: previous study, Red lines: this study)

注) 最終的には観測点の PS 検層結果が得られないために解析の対象外とした 2007 年新潟県中越沖地震 (地震 No.31、Mw 6.6) を除いた 104 地震を採用した。

表 2.2 収集した地震及び観測記録の数

Table 2.2 Number of collected earthquakes and observation records

	地震	観測記録
本研究での追加分	15 地震	54 記録の 3 成分
従来研究	90 地震	333 記録の 3 成分
合計	105 地震	387 記録の 3 成分

表 2.3 解析対象とした地震及び観測記録の数

Table 2.3 Number of analyzed earthquakes and observation records

	地震	観測記録*	
		水平動	上下動
本研究での追加分	15 地震	100 記録 (NS 成分 51 記録 EW 成分 49 記録)	51 記録
従来研究	89 地震	614 記録 (NS 成分 309 記録 EW 成分 305 記録)	304 記録
合計 (本研究の統計処理 の対象)	104 地震	714 記録 (NS 成分 360 記録 EW 成分 354 記録)	355 記録

※ここには、収集した地震及び観測記録のうち、観測点の地盤情報及び観測記録の品質確認を行い、解析で使用する事とした地震及び観測記録の数を示す。

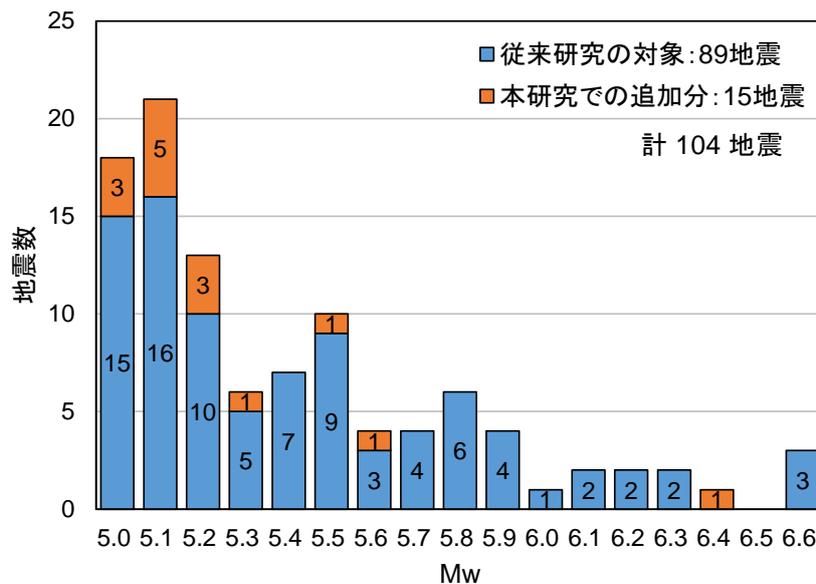


図 2.2 解析対象地震の規模 (Mw) 別の頻度分布

Figure 2.2 Histogram of magnitude (Mw) for analyzed earthquakes

表 2.4 本研究において収集・整理した地震の一覧

Table 2.4 List of earthquakes collected and organized in this study

地震 No.	震央地名	気象庁一元化震源カタログ(一部速報値)					F-netによる震源のメカニズム情報				震源の設定	地震の特性 (ラベル付けに基づくグループ分けで使用)					観測記録数			
		発生時刻	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	Mj	Mw	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)		地震活動地域	断層タイプ	地震活動タイプ	震央と活断層の地表における最短距離			収集記録数	解析記録数*	
															最寄り活断層(震央から40km以内)	最寄り活断層からの概算距離(km)	最寄り推定活断層からの概算距離(km)		水平動	上下動
91	島根県西部	2018/04/09-01:32:30.81	35.185	132.587	12.1	6.1	5.6	330;240	84;85	5;174	B	西日本	横ずれ	本震	なし	—	12	3	6	3
92	長野県北部	2018/05/12-10:29:30.08	36.633	137.901	10.9	5.2	5.0	257;359	50;77	163;42	C	東日本	逆断層	本震	糸魚川-静岡構造線断層帯	4	10	5	10	5
93	長野県北部	2018/05/25-21:13:42.23	36.941	138.590	5.6	5.2	5.0	250;29	45;53	121;62	E	東日本	横ずれ	本震	十日町盆地西縁断層帯	12	26	7	11	6
94	大阪府北部	2018/06/18-07:58:34.14	34.844	135.622	13.0	6.1	5.5	147;49	64;73	19;153	B	西日本	判断難しい	本震	有馬-高槻断層帯	2	3	5	6	3
95	山形県沖	2019/06/18-22:22:19.98	38.608	139.479	14.0	6.7	6.4	23;208	36;54	86;93	B	東日本	逆断層	本震	なし	—	30	1	2	1
96	石川県能登地方	2020/03/13-02:18:46.77	37.280	136.825	12.3	5.5	5.3	25;186	39;52	105;78	C	西日本	逆断層	本震	珠洲-穴水断層帯	21	2	3	6	3
97	長野・岐阜県境付近	2020/04/23-13:44:22.14	36.226	137.662	2.7	5.5	5.1	268;173	65;80	-169;-25	C	西日本	横ずれ	群発地震(本震)	中塔断層帯	15	16	4	8	4
98	長野・岐阜県境付近	2020/05/19-13:12:58.16	36.284	137.629	2.5	5.4	5.2	10;100	86;89	-1;-176	C	西日本	横ずれ	群発地震(本震)	信濃坂断層帯	15	17	3	6	3
99	長野・岐阜県境付近	2020/05/29-19:05:14.99	36.263	137.640	3.7	5.3	5.1	179;270	56;89	-1;-146	C	西日本	横ずれ	群発地震(本震)	信濃坂断層帯	16	17	3	6	3
100	石川県能登地方	2021/09/16-18:42:30.21	37.505	137.301	13.1	5.1	5.0	37;205	36;54	100;83	C	西日本	逆断層	群発地震(本震)	珠洲-穴水断層帯	15	10	3	6	3
101	岐阜県飛騨地方	2021/09/19-17:18:30.43	36.346	137.625	0.0	5.3	5.1	187;94	66;83	8;156	C	西日本	横ずれ	群発地震(本震)	信濃坂断層帯	12	16	3	6	3
102	紀伊水道	2021/12/03-09:28:28.93	33.802	135.147	17.6	5.4	5.1	223;43	11;79	90;90	E	西日本	逆断層	本震	なし	—	—	3	6	3
103	岩手県沖	2022/03/18-23:25:16.39	39.990	142.005	18.1	5.6	5.2	117;216	64;71	-21;-153	E	東日本	横ずれ	本震	なし	—	—	2	4	2
104	石川県能登地方	2022/06/19-15:08:07.59	37.515	137.276	13.1	5.4	5.2	234;61	39;51	84;95	C	西日本	逆断層	群発地震(本震)	珠洲-穴水断層帯	15	8	3	5	3
105	上川地方北部	2022/08/11-00:53:00.16	44.848	142.112	4.7	5.4	5.1	1;184	44;46	88;92	E	東日本	逆断層	本震	間寒別断層帯	8	5	6	12	5

※はざとり解析及び統計処理で採用した記録数である。観測記録の品質確認により不適切と判断した記録(成分)、PS 検層結果がない観測点の記録等がある場合には「収集記録数×3成分=解析記録数」とならないことに留意。

表 2.5 従来研究において収集・整理された地震の一覧 (参考) (1/3)

Table 2.5 List of earthquakes collected and organized in the previous study (reference) (1/3)

地震 No.	震央地名	気象庁一元化震源カタログ					F-netによる震源のメカニズム情報					震源の設定			地震の特性 (ラベル付けに基づくグループ分けで使用)					観測記録数		
		発生時刻	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	Mj	Mw	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)	設定方法 ケースA-E (図4.3参照)	地震活動 地域	断層 タイプ	地震活動 タイプ	震央と活断層の地表における最短距離			収集 記録数	解析記録数*			
															最寄り活断層 (震央から40km以内)	最寄り活断層 からの概算 距離(km)	最寄り推定 活断層からの 概算距離(km)		水平動	上下動		
01	鳥取県西部	2000/10/06-13:30:17.94	35.274	133.349	9.0	7.3	6.6	150;241	85;81	-9;-175	A	西日本	横ずれ	本震	布部断層帯	15	6	4	8	4		
02	鳥取県西部	2000/10/08-13:17:55.28	35.139	133.150	6.8	5.6	5.1	150;240	86;79	-11;-176	C	西日本	横ずれ	余震	布部断層帯	19	19	3	5	2		
03	鳥取県西部	2000/10/08-20:51:17.10	35.369	133.311	8.3	5.2	5.0	165;256	87;81	-9;-177	C	西日本	横ずれ	余震	布部断層帯	13	14	2	4	2		
04	新潟県中越地方	2001/01/04-13:18:21.54	36.957	138.769	11.2	5.3	5.2	8;149	53;44	116;60	E	東日本	逆断層	本震	六日町断層帯	4	37	4	7	4		
05	兵庫県北部	2001/01/12-08:00:04.25	35.466	134.490	10.6	5.6	5.2	90;180	89;82	172;1	E	西日本	横ずれ	本震	雨滝-釜戸断層帯	11	3	2	4	2		
06	栃木・群馬県境	2001/03/31-06:09:42.93	36.821	139.375	4.7	5.2	5.0	89;184	75;74	164;16	E	東日本	横ずれ	本震	片品川左岸断層帯	11	7	4	8	4		
07	鳥取県中・西部	2002/09/16-10:10:49.86	35.370	133.739	9.6	5.5	5.1	167;257	86;83	-7;-176	E	西日本	横ずれ	本震	岩坪断層帯	29	1	4	8	4		
08	宮城県北部	2003/07/26-00:13:08.25	38.435	141.164	11.6	5.6	5.5	209;25	54;36	92;87	B	東日本	逆断層	前震	加護坊山-旭山断層帯	18	3	2	4	2		
09	宮城県北部	2003/07/26-07:13:31.52	38.405	141.171	11.9	6.4	6.1	186;10	52;38	87;93	B	東日本	逆断層	本震	加護坊山-旭山断層帯	22	6	2	4	2		
10	宮城県北部	2003/07/26-16:56:44.53	38.500	141.190	12.0	5.5	5.3	296;131	52;39	81;101	B	東日本	逆断層	余震	加護坊山-旭山断層帯	12	0	2	4	2		
11	新潟県中越地方	2004/10/23-17:56:00.30	37.293	138.867	13.1	6.8	6.6	212;27	47;43	93;87	A	東日本	逆断層	本震	十日町盆地東縁断層帯	5	8	4	6	3		
12	新潟県中越地方	2004/10/23-18:03:12.65	37.354	138.983	9.4	6.3	5.9	218;14	47;45	107;73	B	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	6	3	5	8	4		
13	新潟県中越地方	2004/10/23-18:07:30.95	37.348	138.865	14.9	5.7	5.3	37;182	59;36	110;61	E	東日本	逆断層	余震	悠久山断層帯	5	14	3	4	2		
14	新潟県中越地方	2004/10/23-18:11:56.77	37.253	138.830	11.5	6.0	5.7	20;234	58;37	70;118	B	東日本	逆断層	余震	十日町盆地東縁断層帯	2	13	4	6	3		
15	新潟県中越地方	2004/10/23-18:34:05.69	37.306	138.930	14.2	6.5	6.3	221;33	59;31	94;84	B	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	4	3	4	6	3		
16	新潟県中越地方	2004/10/23-18:57:26.28	37.206	138.864	7.5	5.3	5.1	222;29	55;36	98;79	E	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	6	13	4	6	3		
17	新潟県中越地方	2004/10/23-19:36:45.99	37.217	138.824	11.0	5.3	5.0	19;196	61;29	91;87	E	東日本	逆断層	余震	十日町盆地東縁断層帯	4	15	4	6	3		
18	新潟県中越地方	2004/10/23-19:45:57.19	37.296	138.876	12.4	5.7	5.5	16;217	52;40	76;107	D	東日本	逆断層	余震	十日町盆地東縁断層帯	6	7	4	6	3		
19	新潟県中越地方	2004/10/23-23:34:45.66	37.317	138.906	19.9	5.3	5.0	223;17	55;38	106;69	E	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	6	5	4	6	3		
20	新潟県中越地方	2004/10/25-00:28:08.93	37.203	138.871	10.1	5.3	5.1	13;222	50;44	70;112	E	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	5	13	2	2	1		
21	新潟県中越地方	2004/10/25-06:04:57.57	37.330	138.947	15.2	5.8	5.6	215;29	53;37	94;85	D	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	4	2	3	4	2		
22	新潟県中越地方	2004/10/27-10:40:50.24	37.292	139.033	11.6	6.1	5.8	218;18	60;32	100;73	B	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	4	4	6	10	5		
23	新潟県中越地方	2004/11/04-08:57:29.53	37.430	138.916	18.0	5.2	5.1	190;29	48;43	77;104	E	東日本	逆断層	余震	悠久山断層帯	2	2	4	6	3		
24	新潟県中越地方	2004/11/08-11:15:58.55	37.396	139.032	0.0	5.9	5.5	13;209	53;38	80;103	C	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	11	4	5	8	4		
25	新潟県中越地方	2004/11/10-03:43:08.35	37.370	139.001	4.6	5.3	5.1	22;195	66;25	93;83	E	東日本	逆断層	余震	六日町断層帯	7	4	4	6	3		
26	留萌支庁南部	2004/12/14-14:56:10.54	44.077	141.700	8.6	6.1	5.7	178;23	47;46	73;107	B	東日本	逆断層	本震	石狩沼田断層帯	31	15	2	4	2		
27	福岡県西方沖	2005/04/20-06:11:26.83	33.678	130.288	13.5	5.8	5.4	312;222	90;76	14;180	B	西日本	横ずれ	余震	警固断層帯	12	22	3	6	3		
28	伊豆半島東方沖	2006/04/21-02:50:39.51	34.942	139.196	7.1	5.8	5.6	81;349	84;74	-164;-6	C	東日本	横ずれ	本震	北伊豆断層帯	15	10	4	8	4		
29	能登半島沖	2007/03/25-18:11:45.16	37.304	136.840	13.5	5.3	5.2	40;203	53;38	101;76	C	西日本	逆断層	余震	珠洲-穴水断層帯	22	3	4	7	4		
30	三重県中部	2007/04/15-12:19:29.53	34.791	136.408	16.0	5.4	5.0	347;148	46;45	103;77	C	西日本	逆断層	本震	一志断層帯	2	0	6	11	6		

※はぎとり解析及び統計処理で採用した記録数である。観測記録の品質確認により不適切と判断した記録(成分)、PS 検層結果がない観測点の記録等がある場合には「収集記録数×3成分=解析記録数」とならないことに留意。

表 2.5 従来研究において収集・整理された地震の一覧 (参考) (2/3)

Table 2.5 List of earthquakes collected and organized in the previous study (reference) (2/3)

地震 No.	震央地名	気象庁一元化震源カタログ					F-netによる震源のメカニズム情報					震源の設定			地震の特性 (ラベル付けに基づくグループ分けで使用)						観測記録数		
		発生時刻	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	Mj	Mw	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)	設定方法 ケースA-E (図4.3参照)	地震活動 地域	断層 タイプ	地震活動 タイプ	震央と活断層の地表における最短距離			収集 記録数	解析記録数*				
															最寄り活断層 (震央から40km以内)	最寄り活断層 からの概算 距離(km)	最寄り推定 活断層からの 概算距離(km)		水	陸	上下動		
31	新潟県中越沖	2007/07/16-10:13:22.55	37.557	138.610	16.8	6.8	6.6	215;49	49;42	80;101	A	東日本	逆断層	本震	長岡平野西縁断層帯	16	11	1	0	0			
32	岩手・宮城内陸	2008/06/14-09:20:11.83	38.886	140.673	6.5	5.7	5.5	16;145	72;27	111;42	D	東日本	判断難しい	余震	新庄盆地東縁断層帯	34	8	4	8	4			
33	岩手・宮城内陸	2008/06/16-23:14:38.46	38.997	140.840	7.1	5.3	5.1	348;249	80;48	43;166	E	東日本	横ずれ	余震	北上低地西縁断層帯	21	5	6	12	6			
34	岩手県内陸南部	2010/07/04-04:33:12.17	39.025	140.913	7.1	5.2	5.0	186;18	51;40	83;99	E	東日本	逆断層	本震	北上低地西縁断層帯	14	12	4	8	4			
35	福島県中通り	2010/09/29-16:59:55.98	37.285	140.026	7.6	5.7	5.5	176;341	67;24	96;76	D	東日本	逆断層	本震	会津盆地東縁断層帯	14	7	5	10	5			
36	岐阜県飛騨地方	2011/02/27-05:38:02.61	36.156	137.455	4.3	5.5	5.1	20;254	53;52	51;130	E	西日本	逆断層	本震	江名子-大原断層帯	3	35	8	16	8			
37	長野県・新潟県県境付近	2011/03/12-03:59:15.62	36.986	138.598	8.4	6.7	6.2	29;242	56;38	70;117	B	東日本	逆断層	本震	十日町盆地西縁断層帯	8	28	5	10	4			
38	長野県・新潟県県境付近	2011/03/12-04:31:55.60	36.949	138.573	0.8	5.9	5.6	23;266	61;51	46;141	C	東日本	判断難しい	余震	長野盆地西縁断層帯	12	25	7	12	5			
39	長野県・新潟県県境付近	2011/03/12-05:42:19.80	36.973	138.591	3.8	5.3	5.0	184;87	78;63	28;166	E	東日本	横ずれ	余震	十日町盆地西縁断層帯	10	27	6	12	5			
40	静岡県東部	2011/03/15-22:31:46.34	35.310	138.715	14.3	6.4	5.9	293;31	70;69	157;22	B	東日本	横ずれ	本震	富士川断層帯	11	10	3	6	3			
41	千葉県東方沖	2011/03/16-12:52:02.77	35.837	140.907	10.0	6.1	5.8	152;9	57;39	-113;-59	D	東日本	正断層	本震	なし	—	—	2	4	2			
42	茨城県北部	2011/03/19-08:49:31.45	36.737	140.605	5.0	5.3	5.1	195;4	59;31	-85;-99	E	東日本	正断層	前震	井戸沢断層帯	17	2	4	8	4			
43	茨城県北部	2011/03/19-18:56:48.06	36.784	140.572	5.4	6.1	5.8	141;327	48;42	-94;-86	B	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	16	7	4	8	4			
44	福島県浜通り	2011/03/23-07:12:28.78	37.085	140.788	7.6	6.0	5.7	191;20	64;27	-94;-82	B	東日本	正断層	本震	湯ノ岳断層帯	6	16	2	4	2			
45	福島県浜通り	2011/03/23-07:13:52.77	37.035	140.769	0.9	5.8	5.2	179;337	65;27	-80;-110	E	東日本	正断層	余震	湯ノ岳断層帯	1	18	2	4	2			
46	福島県浜通り	2011/03/23-07:34:56.09	37.098	140.796	6.7	5.5	5.0	164;349	57;34	-93;-86	E	東日本	正断層	余震	湯ノ岳断層帯	8	15	2	4	2			
47	福島県浜通り	2011/03/23-07:36:31.31	37.063	140.771	7.3	5.8	5.4	179;360	55;35	-90;-90	E	東日本	正断層	余震	湯ノ岳断層帯	3	18	2	4	2			
48	福島県浜通り	2011/04/11-17:16:12.02	36.946	140.673	6.4	7.0	6.6	132;301	50;41	-82;-99	A	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	3	5	3	6	3			
49	福島県浜通り	2011/04/11-20:42:35.16	36.966	140.635	10.6	5.9	5.5	264;89	62;28	-92;-86	D	東日本	正断層	余震	井戸沢断層帯	6	5	2	4	2			
50	長野県北部	2011/04/12-07:26:16.87	36.819	138.606	0.0	5.6	5.4	105;14	88;85	-175;-2	C	東日本	横ずれ	本震	長野盆地西縁断層帯	14	27	3	3	1			
51	福島県浜通り	2011/04/12-14:07:42.28	37.053	140.644	15.1	6.4	5.9	76;167	89;51	141;2	B	東日本	横ずれ	余震	井戸沢断層帯	2	15	3	6	3			
52	福島県浜通り	2011/04/13-10:07:58.05	36.915	140.707	4.5	5.7	5.4	180;357	57;33	-89;-92	E	東日本	正断層	余震	井戸沢断層帯	2	6	3	6	3			
53	福島県浜通り	2011/04/14-12:08:58.35	36.984	140.773	10.8	5.4	5.0	227;79	49;46	-113;-66	E	東日本	正断層	余震	湯ノ岳断層帯	4	15	1	2	1			
54	長野県中部	2011/06/30-08:16:37.06	36.189	137.955	4.3	5.4	5.0	349;254	78;70	20;167	C	西日本	横ずれ	本震	糸魚川-静岡構造線断層帯	2	4	7	14	6			
55	和歌山県北部	2011/07/05-19:18:43.44	33.991	135.234	7.3	5.5	5.0	9;233	52;48	59;124	C	西日本	逆断層	本震	中央構造線断層帯	30	22	1	2	1			
56	目高地方中部	2011/09/07-22:29:43.08	42.261	142.589	10.2	5.1	5.0	144;295	72;20	100;63	E	東日本	逆断層	本震	なし	—	5	1	2	1			
57	茨城県北部	2011/09/21-22:30:57.12	36.737	140.577	8.6	5.2	5.1	163;340	58;32	-88;-93	E	東日本	正断層	本震	湯ノ岳断層帯	18	3	4	8	4			
58	福島県浜通り	2011/09/29-19:05:05.66	37.133	140.870	8.8	5.4	5.1	244;69	63;27	-92;-85	E	東日本	正断層	本震	二ツ箭断層帯	3	12	2	4	2			
59	富山県東部	2011/10/05-18:59:58.75	36.533	137.650	0.7	5.4	5.3	279;186	83;65	-155;-7	C	西日本	横ずれ	本震	牛首断層帯	11	9	4	8	4			
60	富山県東部	2011/10/05-19:06:10.19	36.549	137.647	0.0	5.2	5.2	269;177	84;67	-157;-7	C	西日本	横ずれ	余震	牛首断層帯	12	8	3	6	3			

※はざとり解析及び統計処理で採用した記録数である。観測記録の品質確認により不適切と判断した記録(成分)、PS 検層結果がない観測点の記録等がある場合には「収集記録数×3成分=解析記録数」とならないことに留意。

注) 灰色で着色した2007年新潟県中越沖地震(地震No.31)は、震央距離30km以内に1観測点の記録があるが、PS 検層結果がないためにはざとり解析が実施できないことから、最終的な解析対象地震から除外された。

表 2.5 従来研究において収集・整理された地震の一覧 (参考) (3/3)

Table 2.5 List of earthquakes collected and organized in the previous study (reference) (3/3)

地震 No.	震央地名	気象庁一元化震源カタログ					F-netによる震源のメカニズム情報					震源の設定			地震の特性 (ラベル付けに基づくグループ分けで使用)						観測記録数		
		発生時刻	緯度(°)	経度(°)	深さ(km)	Mj	Mw	走向(°)	傾斜(°)	すべり角(°)	設定方法 ケースA-E (図4.3参照)	地震活動 地域	断層 タイプ	地震活動 タイプ	震央と活断層の地表における最短距離			観測 記録数	解析記録数*				
															最寄り活断層 (震央から40km以内)	最寄り活断層 からの概算 距離(km)	最寄り推定 活断層からの 概算距離(km)		水	陸	上下動		
61	茨城県北部	2011/11/20-10:23:40.78	36.711	140.588	9.0	5.3	5.0	169;307	52:47	-61;-122	E	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	20	1	4	8	4			
62	広島県北部	2011/11/21-19:16:29.59	34.872	132.894	11.7	5.4	5.2	241;331	89:80	170;1	C	西日本	横ずれ	本震	なし	—	—	4	8	4			
63	山梨県東部・富士五湖	2012/01/28-07:43:14.09	35.489	138.977	18.2	5.4	5.2	54;190	64:34	113;52	D	東日本	逆断層	本震	塩沢断層帯	12	5	7	14	7			
64	茨城県北部	2012/03/10-02:25:30.65	36.718	140.613	6.5	5.4	5.2	155;340	53:37	-93;-87	E	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	18	0	4	8	4			
65	千葉県東方沖	2012/03/14-21:05:04.32	35.748	140.932	15.1	6.1	5.8	165;30	52:48	-122;-56	D	東日本	正断層	本震	なし	—	—	2	4	2			
66	長野県北部	2012/07/10-12:48:57.44	36.832	138.388	8.5	5.2	5.1	82;343	81:45	-134;-13	E	東日本	横ずれ	本震	長野盆地西縁断層帯	3	10	6	10	5			
67	栃木県北部	2013/02/25-16:23:53.58	36.874	139.413	2.8	6.3	5.8	165;258	80:75	-15;-170	B	東日本	横ずれ	本震	片品川左岸断層帯	18	13	5	10	5			
68	淡路島付近	2013/04/13-05:33:17.75	34.419	134.829	14.9	6.3	5.8	179;333	65:27	102;66	B	西日本	逆断層	本震	六甲-淡路断層帯	7	3	2	4	2			
69	福島県浜通り	2013/09/20-02:25:08.36	37.051	140.695	16.7	5.9	5.4	272;180	83:74	-164;-7	C	東日本	横ずれ	本震	井戸沢断層帯	0	15	4	6	3			
70	茨城県北部	2013/12/31-10:03:00.15	36.692	140.629	6.6	5.4	5.0	170;292	57:50	-50;-135	E	東日本	横ずれ	本震	井戸沢断層帯	20	3	4	6	3			
71	胆振地方中東部	2014/07/08-18:05:24.29	42.650	141.267	3.2	5.6	5.4	240;7	59:45	124;46	E	東日本	横ずれ	本震	当別-野幌丘陵断層帯	40	—	3	6	3			
72	栃木県北部	2014/09/03-16:24:18.94	36.874	139.523	7.1	5.1	5.0	58;168	77:35	123;23	E	東日本	横ずれ	本震	片品川左岸断層帯	26	15	5	10	5			
73	長野県北部	2014/11/22-22:08:17.90	36.693	137.891	4.6	6.7	6.3	25;241	50:47	65;117	B	東日本	逆断層	本震	糸魚川-静岡構造線断層帯	2	4	6	11	6			
74	熊本県熊本地方	2016/04/14-21:26:34.43	32.742	130.809	11.4	6.5	6.1	122;212	74:89	-1;-164	B	西日本	横ずれ	前震	布田川-日奈久断層帯	0	6	6	12	6			
75	熊本県熊本地方	2016/04/14-22:07:35.29	32.776	130.850	8.3	5.8	5.4	23;293	86:88	-178;-4	C	西日本	横ずれ	余震	布田川-日奈久断層帯	1	10	4	8	4			
76	熊本県熊本地方	2016/04/15-00:03:46.45	32.701	130.778	6.7	6.4	6.0	119;211	62;86	-4;-152	C	西日本	横ずれ	余震	布田川-日奈久断層帯	0	11	4	8	4			
77	熊本県熊本地方	2016/04/16-01:45:55.45	32.863	130.899	10.6	5.9	5.7	286;81	35:57	-70;-104	D	西日本	正断層	余震	布田川-日奈久断層帯	3	2	4	8	4			
78	熊本県熊本地方	2016/04/16-03:03:10.78	32.964	131.087	6.9	5.9	5.5	209;116	60:85	-174;-30	D	西日本	横ずれ	余震	鞍岳断層帯	8	8	3	6	3			
79	熊本県熊本地方	2016/04/16-03:55:53.08	33.027	131.191	10.9	5.8	5.5	220;126	72:78	-167;-19	D	西日本	横ずれ	余震	別府地溝断層帯	10	3	3	6	3			
80	大分県中部	2016/04/16-07:11:37.48	33.272	131.396	5.7	5.4	5.1	291;96	29:61	-77;-97	E	西日本	正断層	余震	別府地溝断層帯	1	3	1	2	1			
81	熊本県熊本地方	2016/04/16-09:48:32.68	32.847	130.835	15.9	5.4	5.2	230;77	38:55	-112;-73	C	西日本	正断層	余震	布田川-日奈久断層帯	5	7	4	8	4			
82	熊本県熊本地方	2016/04/16-16:02:01.03	32.699	130.720	12.3	5.4	5.1	255;72	30:60	-88;-91	E	西日本	正断層	余震	布田川-日奈久断層帯	5	5	3	6	3			
83	熊本県熊本地方	2016/04/18-20:41:57.94	33.002	131.200	8.6	5.8	5.5	314;224	86:87	3;176	D	西日本	横ずれ	余震	別府地溝断層帯	13	2	2	4	2			
84	熊本県熊本地方	2016/04/19-17:52:13.69	32.535	130.635	10.0	5.5	5.3	221;126	60:81	-169;-30	C	西日本	横ずれ	余震	布田川-日奈久断層帯	3	8	4	8	4			
85	鳥取県中部	2016/10/21-14:07:22.57	35.381	133.856	10.6	6.6	6.2	342;250	80:81	9;170	B	西日本	横ずれ	本震	岩坪断層帯	18	7	3	6	3			
86	茨城県北部	2016/12/28-21:38:49.04	36.720	140.574	10.8	6.3	5.9	324;160	29:62	-105;-82	B	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	20	2	6	10	5			
87	長野県南部	2017/06/25-07:02:15.36	35.868	137.587	6.7	5.6	5.2	219;13	40:53	111;73	C	西日本	逆断層	本震	西野断層帯	8	13	6	12	6			
88	鹿児島湾	2017/07/11-11:56:35.47	31.384	130.620	10.2	5.3	5.3	83;179	56:82	-10;-146	E	西日本	横ずれ	本震	なし	—	—	2	4	2			
89	茨城県北部	2017/08/02-02:02:07.51	36.804	140.535	8.7	5.5	5.1	123;284	41;51	-76;-102	E	東日本	正断層	本震	井戸沢断層帯	18	5	5	8	4			
90	長野県中部	2017/12/06-00:13:49.38	36.377	137.973	10.4	5.3	5.1	352;248	43;77	19;131	E	西日本	横ずれ	本震	糸魚川-静岡構造線断層帯	3	14	5	10	5			

\*はざり及び統計処理で採用した記録数である。観測記録の品質確認により不適切と判断した記録(成分)、PS 検層結果がない観測点の記録等がある場合には「収集記録数×3成分=解析記録数」とならないことに留意。

### 3. はぎとり解析

#### 3.1 解析方法

2.で追加解析対象として選定した 15 地震の地中観測記録（水平動 100 記録、上下動 51 記録）について、図 3.1 に示すように、地中地震計よりも上の地盤の影響を除去するための「はぎとり解析」を実施し、硬質地盤の解放面における地震動（以下「はぎとり波」という。）を算出した。

はぎとり解析では、従来研究と同様に、一次元地盤モデルを用いた重複反射理論<sup>12,13</sup>による線形解析を採用した。はぎとり解析に用いる地中地震計から地表地震計までの地盤モデル（層厚、 $V_s$ 、P 波速度 ( $V_p$ )）は、KiK-net による PS 検層結果の公開情報に基づいて設定した。

KiK-net 観測点の PS 検層結果の例を図 3.2 に示し、設定した地盤モデルの例を表 3.1 に示す。密度は、密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )と  $V_p$  ( $\text{m}/\text{s}$ )の関係式<sup>14</sup>により求めた。減衰定数は、地盤モデルの全層で共通の値を設定した。減衰定数の設定に当たっては、複数パターンの減衰定数を設定した地盤モデルを用いた解析により、それぞれ地中観測記録（層内波）を地表に立ち上げた露頭波（以下「立ち上げ波」という）を算出し、立ち上げ波と地表の観測記録の応答スペクトルの適合度が最も高くなる減衰定数を採用することとした。水平動については減衰定数を 1%、3%、5%、7%及び 9%の 5 パターンを、上下動については減衰定数を 1%、3%及び 5%の 3 パターンを試行した（詳細は 3.2 参照）。なお、上下動に対しては、強い非線形性が生じた場合を想定した 7%及び 9%の減衰定数は適用しないこととした。

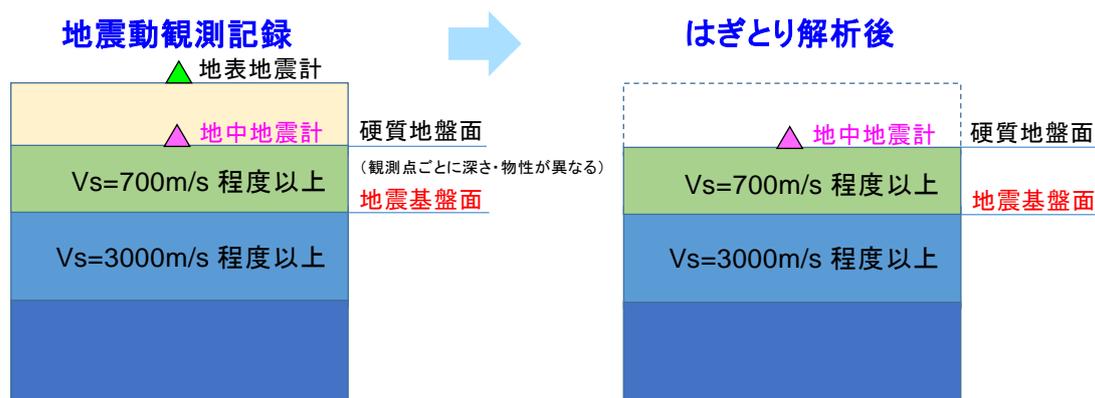
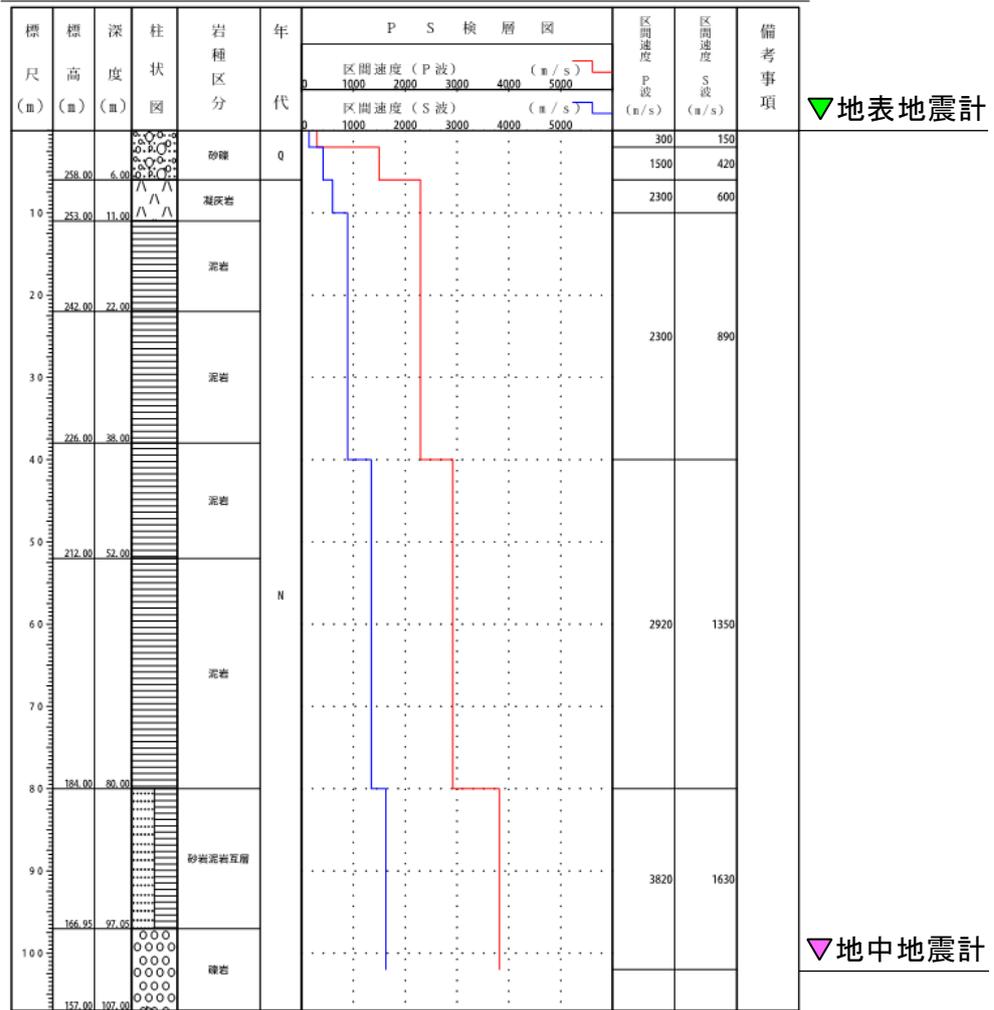


図 3.1 地中地震計より上の表層地盤の影響を取り除くための「はぎとり解析」の概念図  
Figure 3.1 Conceptual diagram of “outcropping analysis” to remove effects of the surface layer above the downhole seismometer

ボーリング柱状図

観測点名：朝日(あさひ)  
 所在地：山形県東田川郡朝日村大字大島字寿岡112番地  
 緯度：38° 28' 3.0"  
 孔口標高：+264m  
 観測点コード：YMTH13  
 経度：139° 45' 50.0"  
 総掘進長：107.00m



出典) 国立研究開発法人防災科学技術研究所による観測点情報<sup>8</sup>

図 3.2 PS 検層結果の例：KiK-net 朝日 (YMTH13) 観測点

Figure 3.2 Example of PS logging result: the KiK-net Asahi (YMTH13) station

表 3.1 設定した地盤モデルの例：KiK-net 朝日 (YMTH13) 観測点

Table 3.1 Example of set underground structure model

層厚 (m)	下面深度 (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
2	2	150	300	1.29	
4	6	420	1500	1.93	
4	10	600	2300	2.15	
30	40	890	2300	2.15	
40	80	1350	2920	2.28	
24	104	1630	3820	2.44	▽地中観測位置
-	-	1630	3820	2.44	

注) 減衰定数は観測記録ごとに分析した上で設定した。

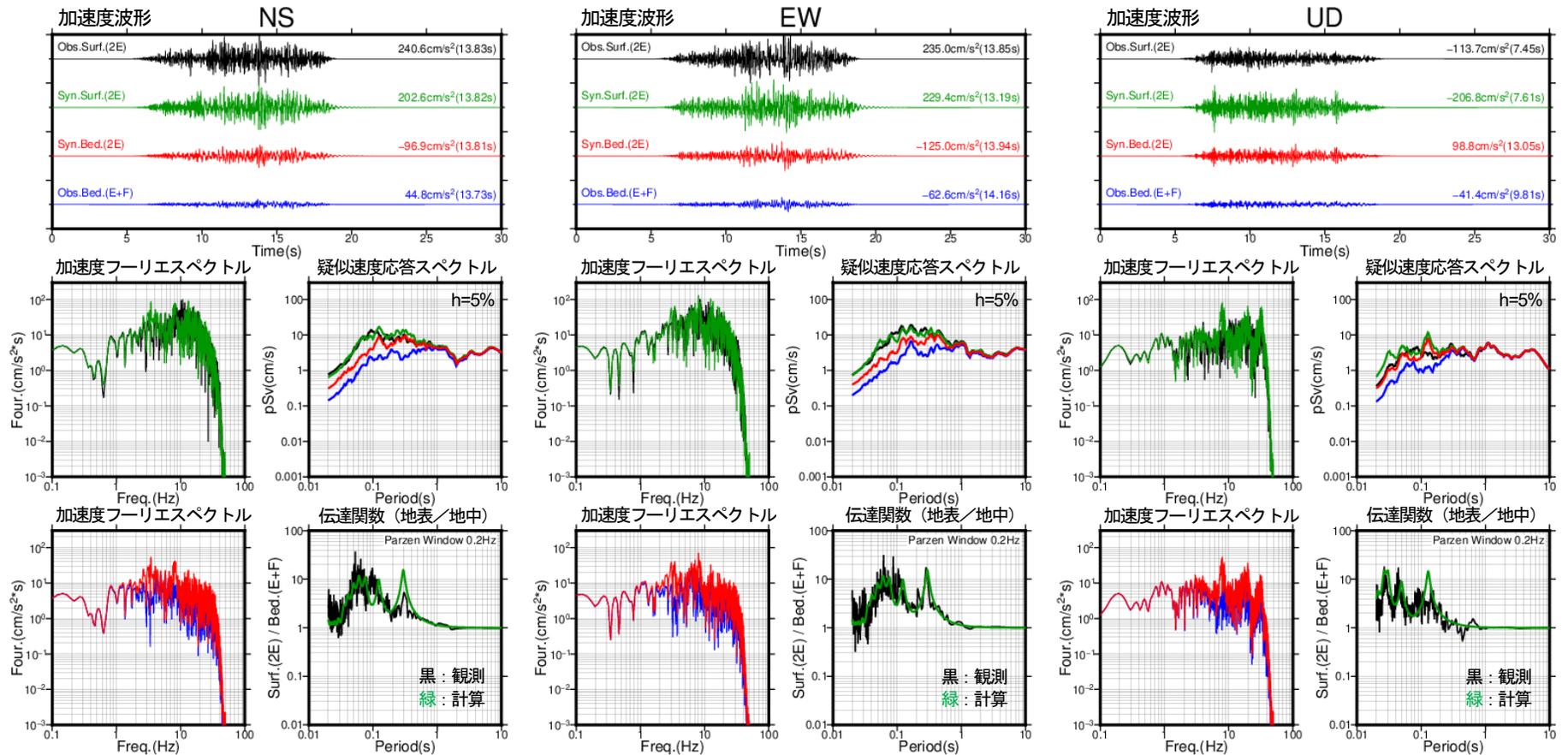
### 3.2 解析結果

はぎとり解析結果の例として、2019年6月18日山形県沖の地震(Mw6.4)のKiK-net朝日(YMTH13)の記録について、地盤の減衰定数5%で解析した場合の結果を図3.3に示す。この図には、3成分それぞれの観測記録と解析結果の加速度波形、フーリエスペクトル、減衰定数(h)5%の擬似速度応答スペクトル(pSv)、及び地表・地中地震計の間の伝達関数(露頭面(2E)/層内面(E+F))を示す。

上記と同様の記録について、地盤に設定する減衰定数を変えた場合のはぎとり解析結果の比較を図3.4に示す。図3.4(a)には、地中観測記録(層内波)に対する地表観測記録(露頭波)又は立ち上げ波(露頭波)のフーリエスペクトル比(伝達関数)を示す。上段の横軸は線形軸で周波数を示し、下段の横軸は対数軸で周期を示す。

図3.4(b)の上段には、地表における立ち上げ波(計算:露頭波)及び地表観測記録(観測:露頭波)の応答スペクトルの重ね描きを、下段には計算/観測の応答スペクトル比を示す。この例では、水平動と上下動ともに減衰定数を5%として解析した場合(緑線)に、地表観測記録と立ち上げ波の対数残差が最も小さくなることから、減衰定数5%を採用した。また、はぎとり解析の精度(以下「はぎとり精度」という。)については、ここに示す立ち上げ波を計算して地表観測記録と比較し、各周期における「立ち上げ波(緑線)/地表観測記録(黒線)」の応答スペクトルの比が1/3~3倍の範囲外となった場合に「はぎとり精度が低い」と判断することとした。この基準に基づき、この例でははぎとり精度が水平動では高いが、上下動では一部周期で低いと判断した。

図3.4(c)の上段には、地中におけるはぎとり波(計算:露頭波)及び地中観測記録(観測:層内波)の応答スペクトルの比較を、下段には計算/観測の応答スペクトル比を示す。この図より、地盤の減衰定数の違いによるはぎとり波の計算結果の差異は、図3.4(b)の立ち上げ波の場合よりも小さくなる傾向があることから、地中地震計位置でははぎとり解析においては、上部地盤の減衰の影響は比較的小さいことが示唆される。



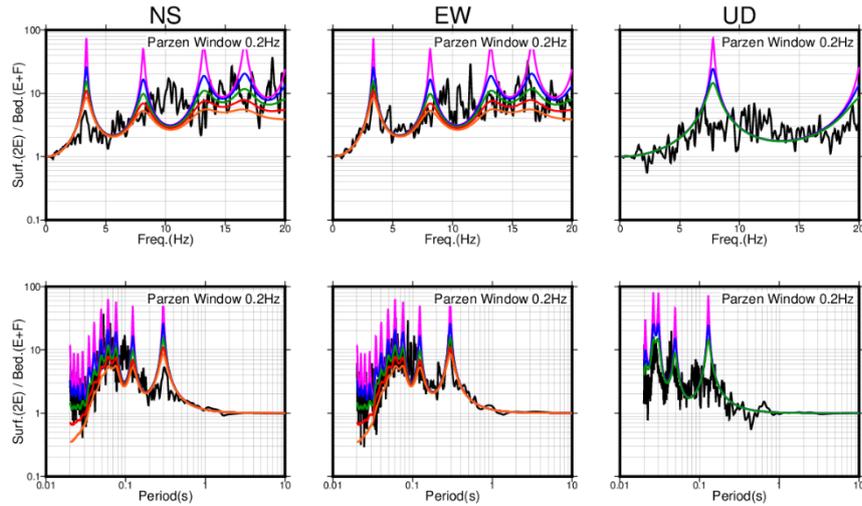
黒：地表観測記録（露頭2E） 緑：立ち上げ波（計算：地表の露頭2E） 赤：はざとり波（計算：地中の露頭2E） 青：地中観測記録（層内E+F）

※地盤の減衰定数を水平動・上下動ともに5%（最終的に採用した値）として解析した結果

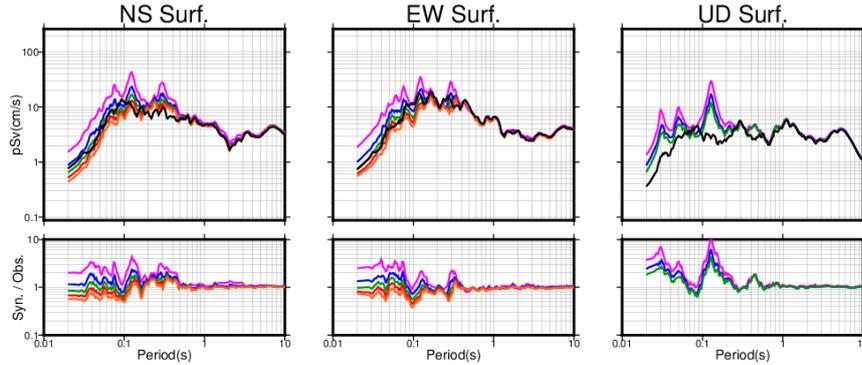
図 3.3 はざとり波の算出例：2019年6月18日山形県沖の地震（Mw6.4）のKiK-net朝日（YMTH13）観測点の記録（断層最短距離：28.9 km、地中地震計深度：104 m、地中地震計位置のVs：1630 m/s、Vp：3820m/s）

Figure 3.3 Example of derived outcropping motion: record at the KiK-net Asahi (YMTH13) station during the Yamagata-oki, Japan earthquake (Mw6.4) on June 18, 2019 (fault shortest distance: 28.9 km, Depth of downhole seismometer: 104 m, underground Vs: 1630 m/s, Vp: 3820m/s)

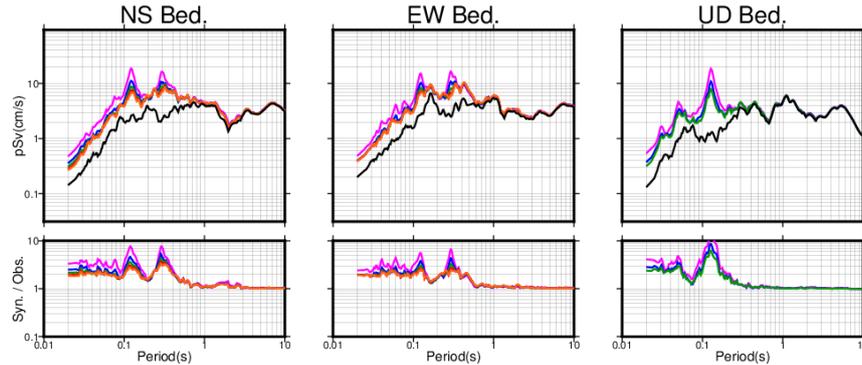
(a) 地表(露頭 2E)／地中(層内 E+F)のフーリエスペクトル比(伝達関数)



(b) 地表における計算(露頭 2E)と観測(露頭 2E)の疑似速度応答スペクトルの比較



(c) 地中における計算(露頭 2E)と観測(層内 E+F)の疑似速度応答スペクトルの比較



桃: 計算(h=1%) 青: 計算(h=3%) 緑: 計算(h=5%) 赤: 計算(h=7%) 橙: 計算(h=9%) 黒: 観測

※最終的に地盤の減衰定数を水平動 5%及び上下動 5%として解析したはざとり波を採用

図 3.4 はざとり解析における減衰定数 (h) の調整の例: 2019 年 6 月 18 日山形県沖の地震の KiK-net 朝日 (YMTH13) 観測点の記録

Figure 3.4 Example of adjustment of damping constant on the analysis to derive outcropping motion: the record at the KiK-net Asahi (YMTH13) station during the Yamagata-oki, Japan earthquake on June 18, 2019

## 4. 応答スペクトルの補正

### 4.1 補正方法

3.で算出した硬質地盤面でははざとり波を、震源近傍での地震基盤相当面における地震動として扱うために、従来研究と同様に、はざとり波の応答スペクトルに対し、必要に応じて「震源距離補正」及び「地盤物性補正」を施した（表 4.1）。

#### (1) 震源距離補正

震央距離 30 km 以内で収集した観測記録から算出したはざとり波の応答スペクトルを、半径 10 km 程度の震源近傍の領域内で観測された記録の応答スペクトルと想定して統計処理上のデータ数を確保するために、はざとり波の応答スペクトルに震源距離補正を施した（図 4.1）。ここで、震源近傍の領域の設定は、本研究で対象とする地震は最大で Mw6.5 程度であり、その断層長さは 20 km 程度となり、断層が位置するような領域は「震源近傍」となり得ることから、Mw6.5 程度の地震の断層が収まる半径 10 km 程度の範囲とした。深さ方向については、本研究では日本の平均的な地震発生層深さを参考に震源深さ 20 km 以浅の地震の記録を収集対象としていることから（表 2.1）、深さ 20 km 程度までの範囲となる。

震源距離補正では、震源（表 2.4 参照）と観測点の最短距離を 5 km（10 km の中間距離）に補正することを基本とした。ただし、最短距離が元々 5 km 未満の場合には補正を行わないこととし、また、断層上端の深さが 5 km よりも深い場合には、深さ方向の距離を変えずに距離が最も近くなるように、断層の直上に観測点を移動させることにより最短距離に補正する方針を採用し、実際は半径 10 km 以内のより近いところに多くの観測点が集まる（保守的になる）ように工夫した（図 4.2）。

具体的には、補正前後の距離における距離減衰式<sup>15(注3)</sup>による応答スペクトルの推定値を用いて以下の補正倍率を算出し、それをはざとり波の応答スペクトルに乗じることにより、震源近傍の観測記録に相当する応答スペクトルの大きさに補正した（表 4.1）。

$$\text{補正倍率} = \frac{\text{補正後の距離での距離減衰式による応答スペクトルの推定値}}{\text{補正前の距離での距離減衰式による応答スペクトルの推定値}} \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで、補正前の最短距離は、地震ごとに図 4.3 に示すケース A～E のいずれかの方法により断層面又は点震源を設定し、各観測点からの 3 次元的な最短距離を推定して設定した。各地震の震源の設定方法（採用ケース）は表 2.4 及び表 2.5 に示す。点震源の設定は Mw5.5 未満の地震を対象としたため、震源の面としての広がり小さく点震源を仮

(注3) 震源距離補正においては、地盤条件（Vs 等の違い）の影響を避けて、距離による減衰特性を補正することが重要であることから、地震基盤相当面における水平動及び上下動の応答スペクトルの評価が可能な距離減衰式<sup>15</sup>を採用した。

定することによる影響は小さくなり、また、面震源の場合よりも補正距離が長くなるのでやや保守的な補正となる。

なお、最短距離 5 km に補正することを基本とする設定の保守性については、その後の安全研究において、半径 10 km 程度の領域に観測点がばらつきを持って分布するような設定に比べて、応答スペクトルが大きくなるものの、過度に保守的な設定とはなっていないことを確認している（付録 1）<sup>9</sup>。

## (2) 地盤物性補正

硬質地盤面（Vs 500 m/s 程度以上）の観測記録から算出したはざとり波の応答スペクトルを、地震基盤相当面（Vs 2200 m/s 以上）における記録の応答スペクトルとして扱うために、表 4.2 に示す条件で、地盤物性補正を実施した（図 4.4）。具体的には、Vs 2200 m/s（Vp 4200 m/s）未満の地盤のはざとり波を対象に、応答スペクトルに対して、経験式<sup>16(注4)</sup>から推定した地盤増幅率から求めた以下の補正倍率を乗じることにより、地震基盤相当面におけるスペクトルレベルに補正した。

$$\text{補正倍率} = \frac{1}{\text{経験式による地震基盤相当面から地震計設置位置までの地盤増幅率}} \dots(4.2)$$

ここで採用した地盤増幅率の経験式では、Vs 2200 m/s（Vp 4200 m/s）の地盤が「地震基盤相当」と定義され、Vs 3000 m/s 程度の地震基盤からの地盤増幅率は十分小さく、地震動としては同等とみなすことができると仮定している。なお、この経験式の地盤増幅率算定の基準となった小玉川観測点（Vs 2200 m/s）といわき観測点・富岡観測点（Vs 2800 m/s）の観測記録を用いた解析が行われ、両者の地盤増幅による地震動の差異が十分に小さいことが確認されている<sup>17</sup>。

---

(注4) 地盤物性補正においては、地震基盤相当面（Vs 2200 m/s 以上）から硬質地盤面（Vs 500 m/s 程度以上）までの地盤増幅率を、水平動と上下動に対して推定可能な地盤増幅率の経験式<sup>16</sup>を採用した。

表 4.1 応答スペクトルの補正方針

Table 4.1 Adjustment policy for response spectra

項目	震源距離補正	地盤物性補正
方針	最短距離 5 km を基本として観測点を震源に近づけた場合の増幅倍率を応答スペクトルに乗じる (詳細は図 4.2 参照)	地震基盤相当面 ( $V_s$ 2200 m/s 以上) となるように応答スペクトルを地盤増幅率で除する (詳細は表 4.2 参照)
使用する式	原子力安全基盤機構(2013) <sup>15</sup> による応答スペクトルの距離減衰式を使用	Noda <i>et al.</i> (2002) <sup>16</sup> の距離減衰式における地盤増幅の経験式を使用

注) 元々最短距離 5 km が以内又は  $V_s$  が地震基盤相当面である場合には各補正は実施しない。

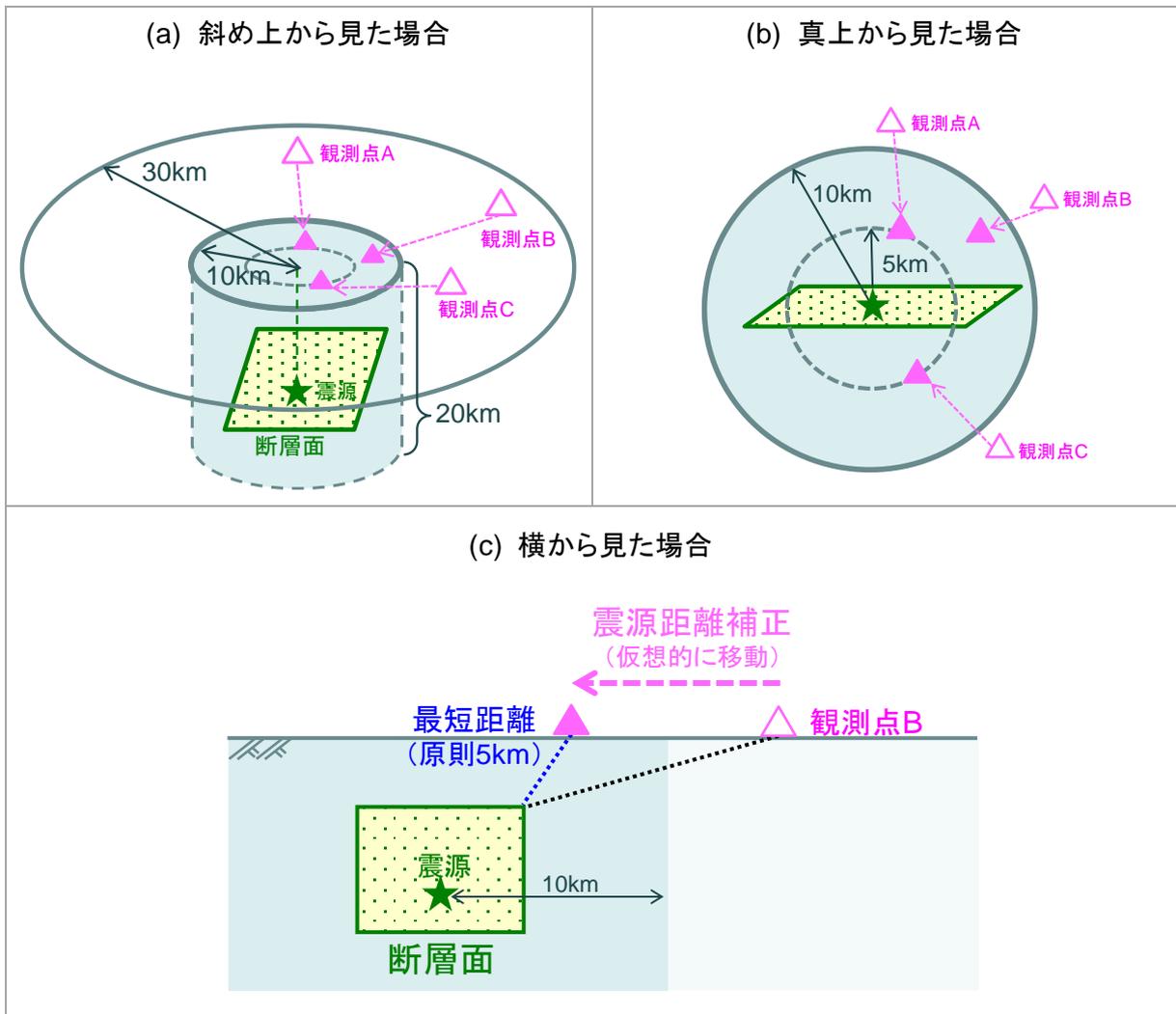
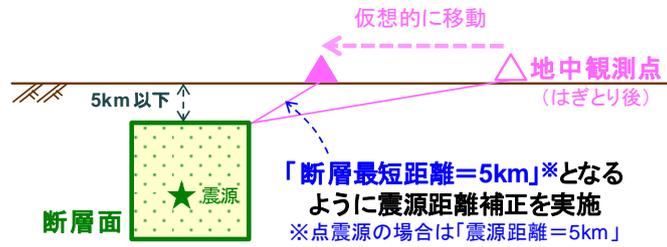


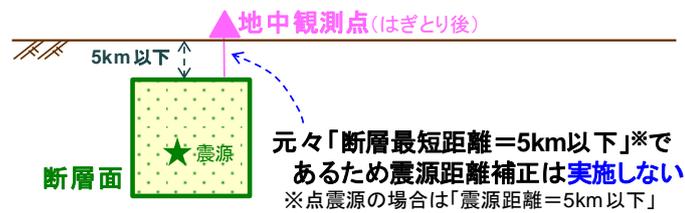
図 4.1 震源距離補正の概念図

Figure 4.1 Conceptual diagram showing the adjustment of source-station distance

- (a) 断層上端深さが5 km以浅であり  
補正前の断層最短距離が5 kmより遠い場合



- (b) 断層上端深さが5 km以浅であり  
補正前の断層最短距離が5 kmより近い場合



- (c) 断層上端深さが5 kmより深い場合

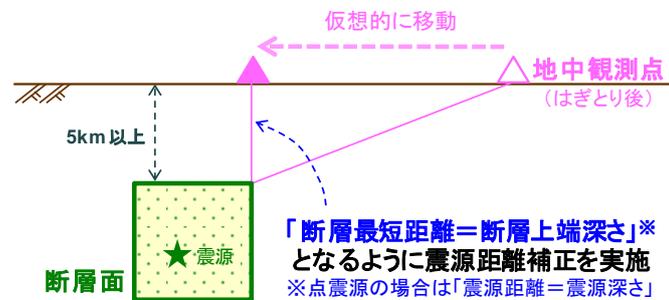


図 4.2 断層上端深さと震源距離補正の方針の対応関係

Figure 4.2 Correspondence between depth of fault top depth and policy of the source-station distance adjustment

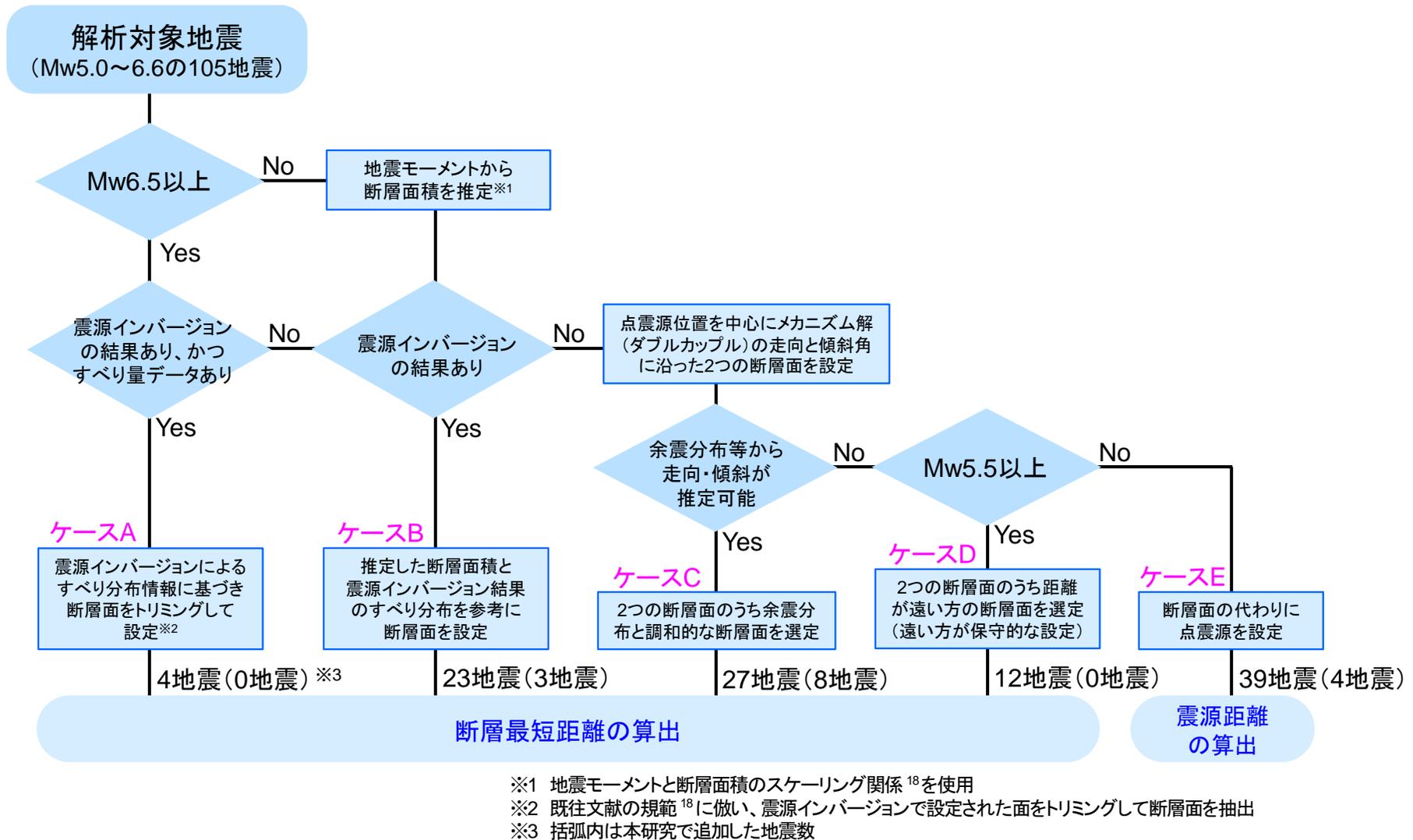


図 4.3 補正前の震源距離の推定に用いる震源（面断層又は点震源）の設定手順

Figure 4.3 Procedure for setting sources (fault planes or point sources) used to estimate source-station distances before adjustment

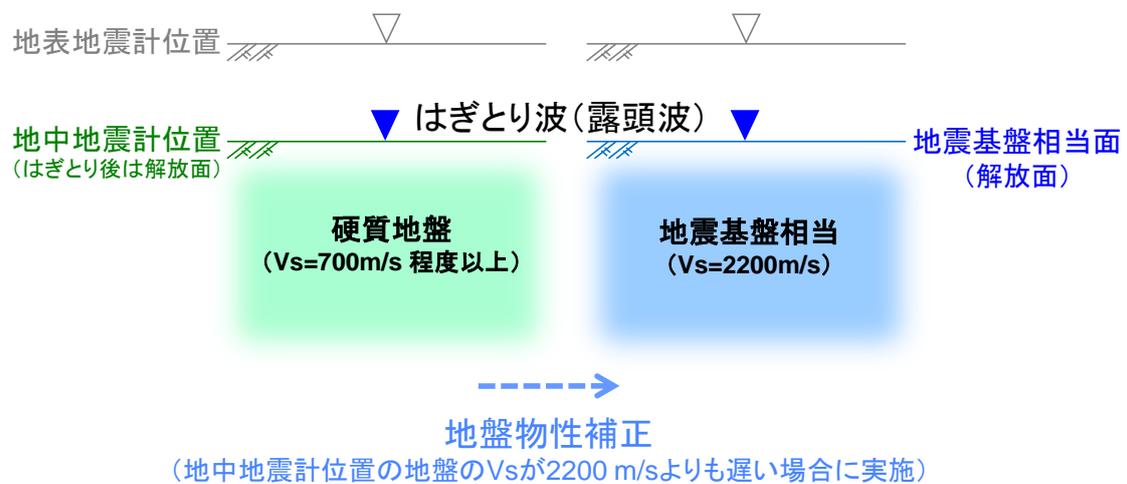


図 4.4 地盤物性補正の概念図

Figure 4.4 Conceptual diagram showing the adjustment of ground property

表 4.2 地盤物性補正の条件

Table 4.2 Conditions for the ground property adjustment

地中地震計位置の地盤の速度	方針
水平動：Vs 2200m/s <u>未満</u> 上下動：Vp 4200m/s <u>未満</u>	地盤増幅倍率の経験式を用いて応答スペクトルを地震基盤相当面 (Vs 2200m/s、Vp 4200m/s) における地震動レベルに補正。
水平動：Vs 2200m/s <u>以上</u> 上下動：Vp 4200m/s <u>以上</u>	地盤物性補正を実施しない。

## 4.2 補正結果

はぎとり波の応答スペクトルに対して、4.1の方法で震源距離補正と地盤物性補正を施し、補正前後の応答スペクトルを比較した。

図 4.5～図 4.8 に、水平動及び上下動の補正前後の擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）及び代表的な周期における地震動強さ〔擬似速度応答の常用対数（ $\log pSv$ ）〕のヒストグラムを示す。

擬似速度応答スペクトル図（各図上段）について、緑線は従来研究ではぎとり波の応答スペクトル（水色線）から求めた平均と標準偏差（平均 $\pm 1\sigma$ ）の結果である。赤線は、従来研究で用いたはぎとり波（水色線）に本研究で新たに算出したはぎとり波（青線）を追加して求めた応答スペクトルの平均と標準偏差の結果である。この図より、従来研究（緑線）及び本研究（赤線）のはぎとり波の応答スペクトルの平均と標準偏差は、周期 0.1 秒程度より長周期側では本研究の結果の方が従来研究よりもわずかに小さいものの、ほぼ同等となることが分かる。

代表周期における地震動強さのヒストグラム（各図下段）について、水色棒は従来研究で用いられた応答スペクトル、青色棒は本研究にて追加した応答スペクトルであり、赤線は本研究でデータを追加して算出した平均と標準偏差を用いて対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数である。この図より、補正後の地震動強さのヒストグラム（図 4.6 及び図 4.8）は、特に周期 1 秒程度以下の短周期側では左右対称の対数正規分布に近い形状を示すことが確認できた。一方、周期 2 秒程度以上の長周期側のヒストグラムでは、データセットに含まれる地震規模（小さい地震ほど数が多い）の影響により、データの最頻値が確率密度関数よりも左側に偏る傾向がみられる。これらの傾向は、従来研究と同様である。

図 4.9 及び図 4.10 に、従来研究と本研究を合わせたデータセットから求めた水平動及び上下動の補正前後の平均スペクトル及び標準偏差の比較を示す。水平動と上下動ともに、地盤物性補正に比べて震源距離補正の方が平均スペクトルと標準偏差の変化が顕著である。平均スペクトルについては、水平動と上下動ともに、「震源距離のみ補正」の場合のスペクトルが最も大きく、「震源距離及び地盤物性で補正」、「補正前」、「地盤物性のみ補正」の順で小さくなった。標準偏差（ばらつき）については、「補正前」が最も大きく、次いで「地盤物性のみ補正」、「震源距離のみ補正」となり、統計処理で用いる「震源距離及び地盤物性で補正」の場合が最も小さくなった。

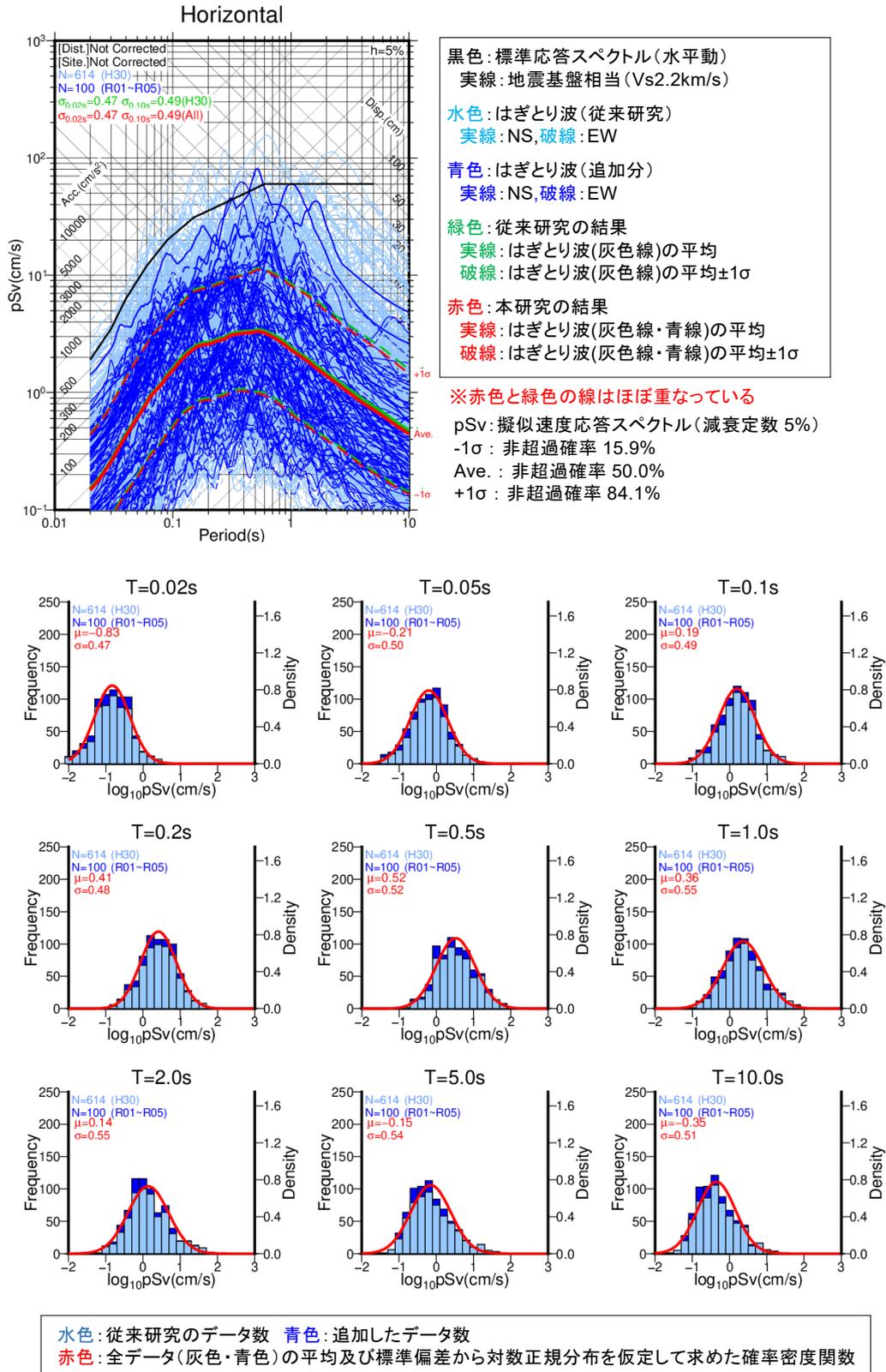


図 4.5 補正前の水平動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）

Figure 4.5 Response spectra of horizontal ground-motion before adjustment (top) and histograms and probability density functions of ground-motion strength at representative periods (bottom)

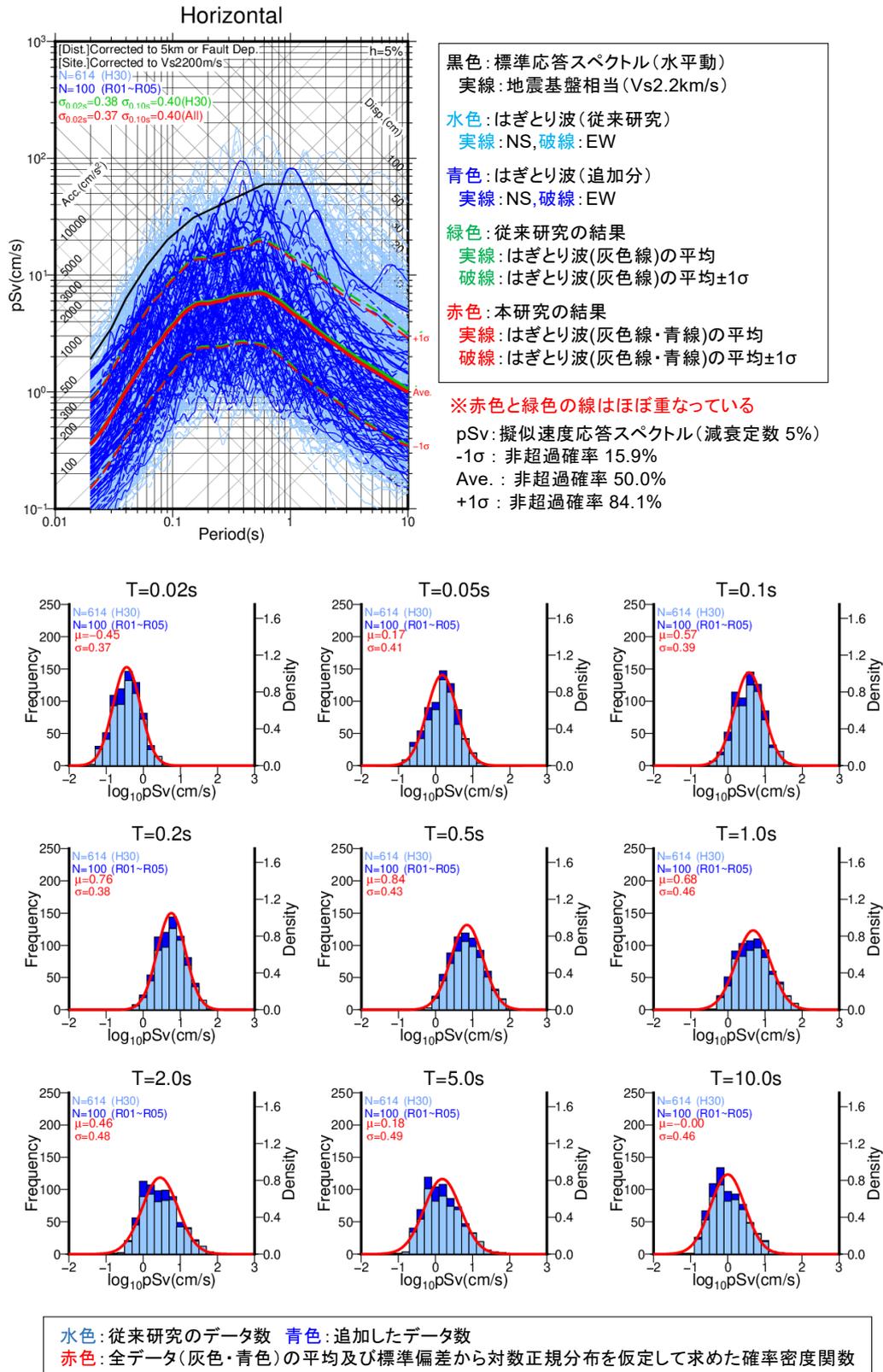


図 4.6 補正後の水平動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）

Figure 4.6 Response spectra of horizontal ground-motion after adjustment (top) and histograms and probability density functions of ground-motion strength at representative periods (bottom)

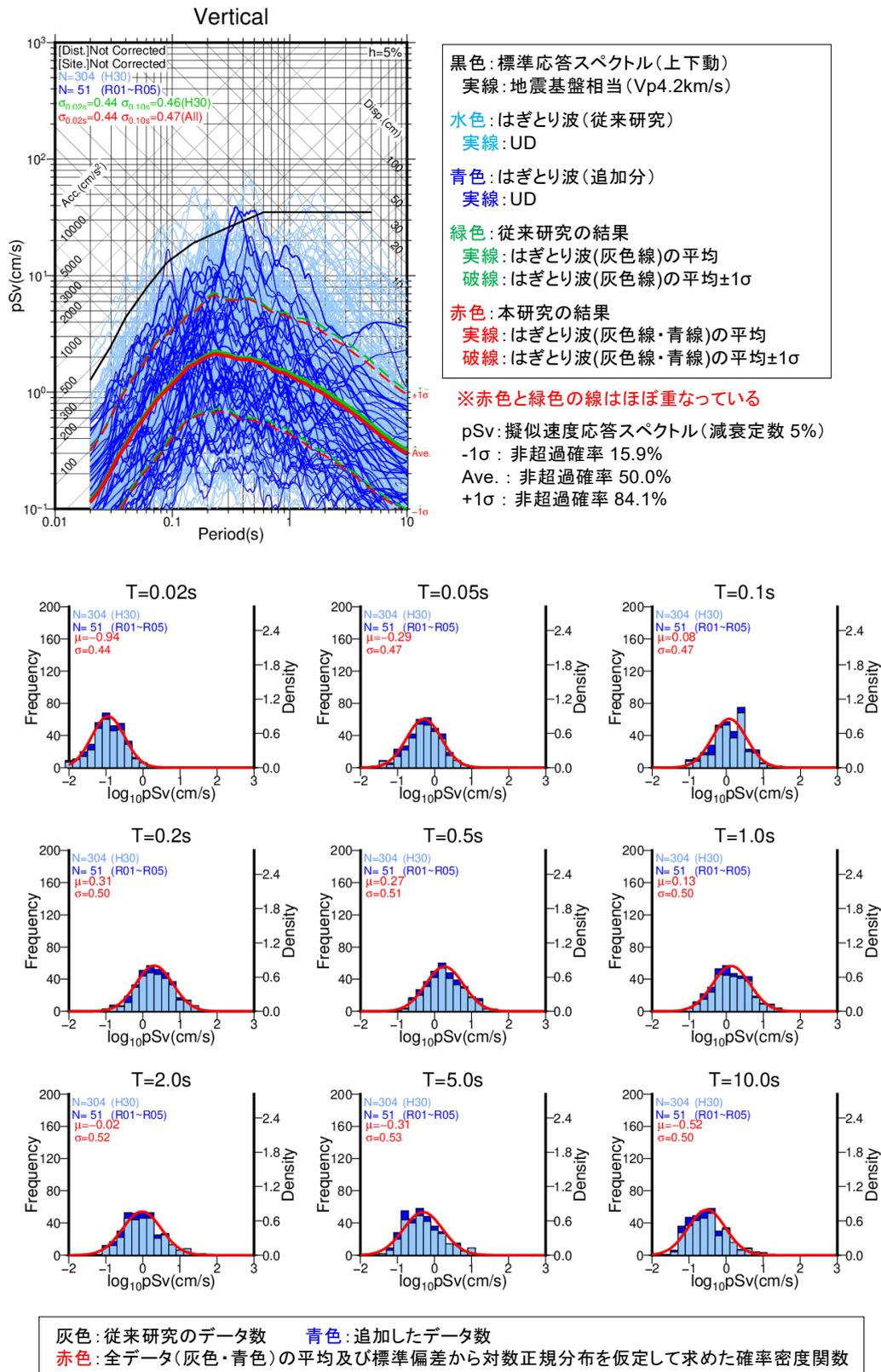


図 4.7 補正前の上下動の応答スペクトル（上段）及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数（下段）

Figure 4.7 Response spectra of vertical ground-motion before adjustment (top) and histograms and probability density functions of ground-motion strength at representative periods (bottom)

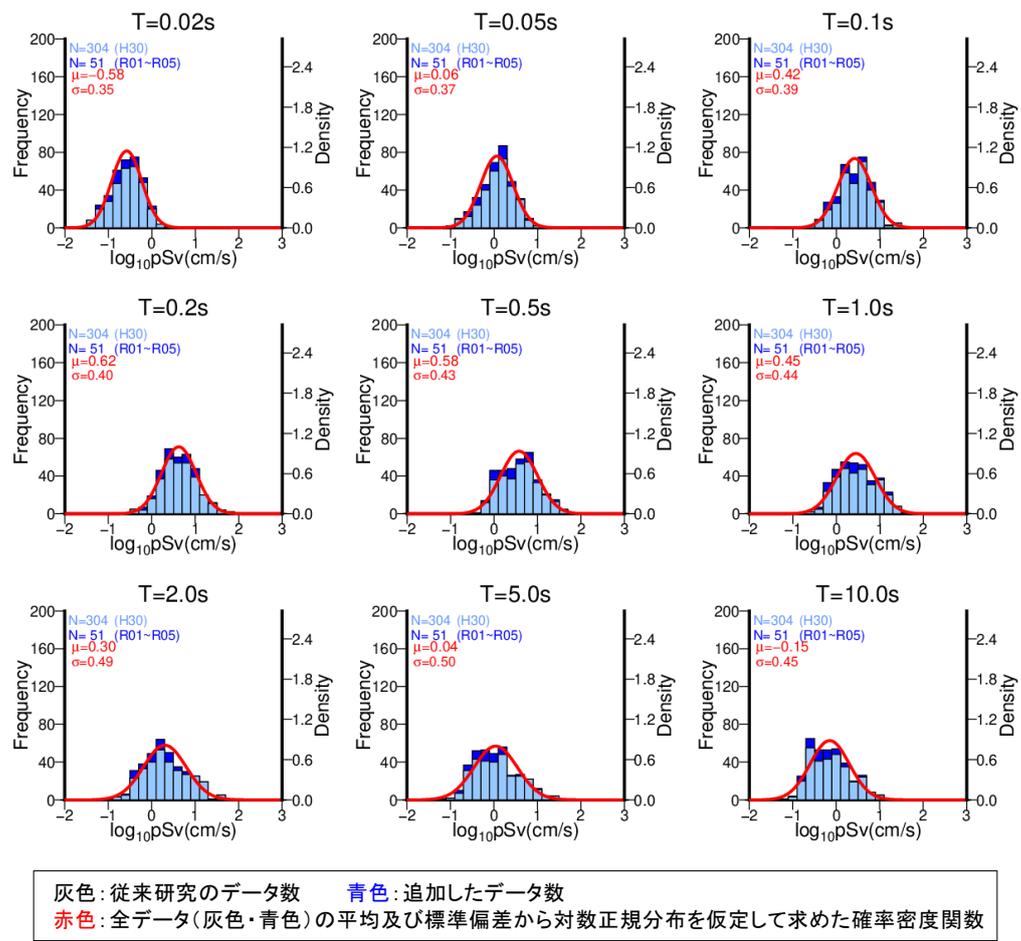
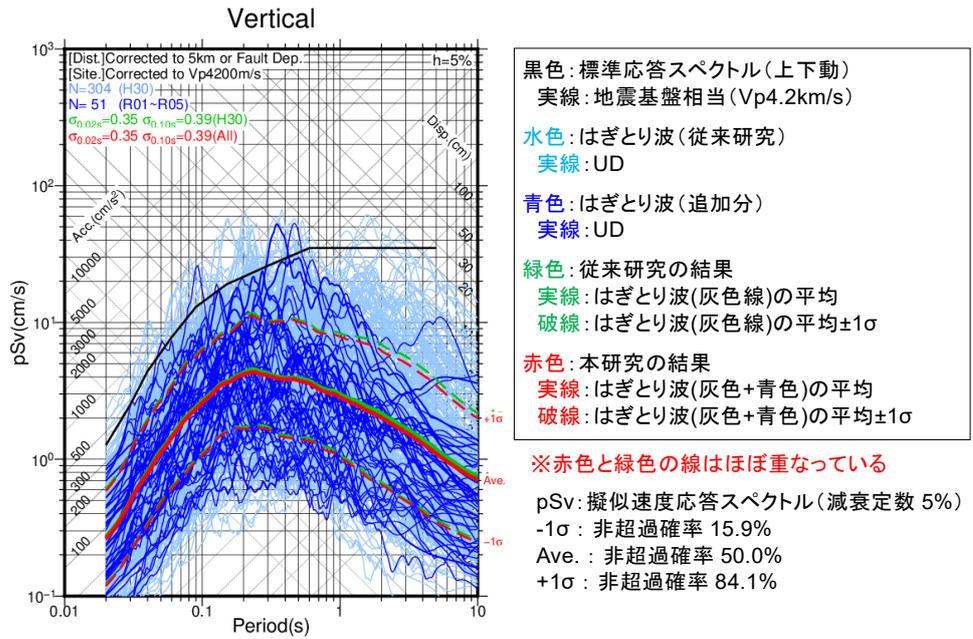
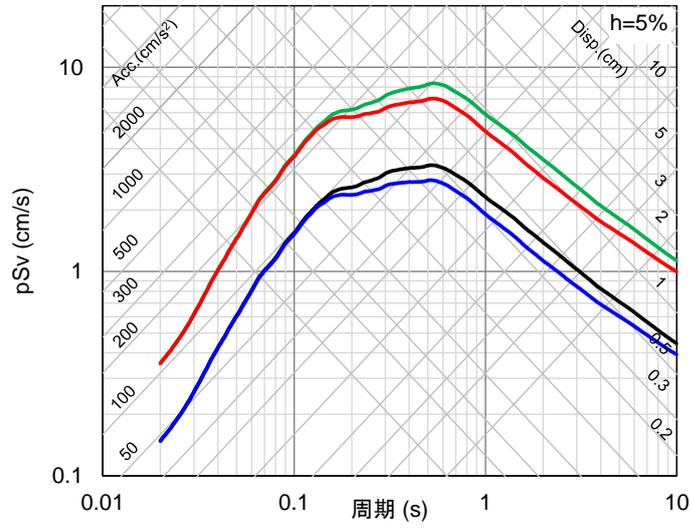


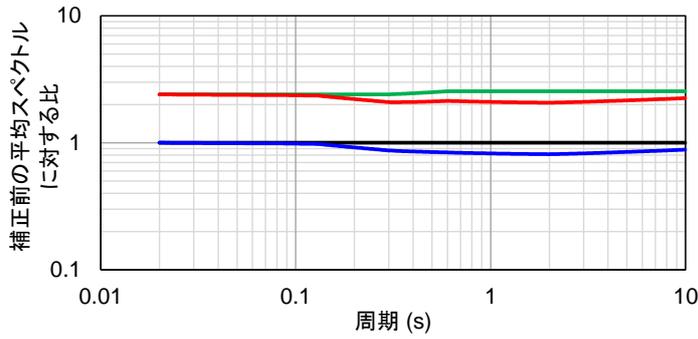
図 4.8 補正後の上下動の応答スペクトル (上段) 及び代表的な周期における地震動強さのヒストグラムと確率密度関数 (下段)

Figure 4.8 Response spectra of vertical ground-motion after adjustment (top) and histograms and probability density functions of ground-motion strength at representative periods (bottom)

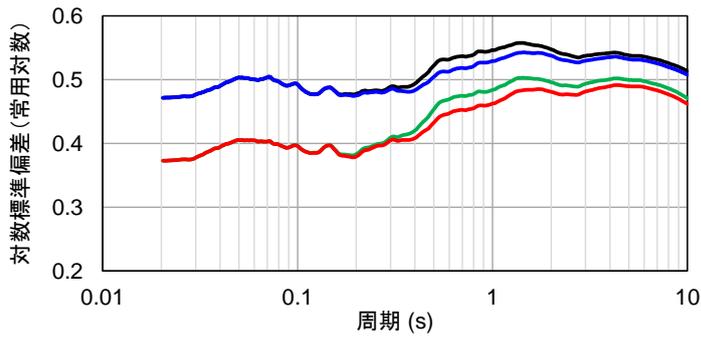
(a) 平均スペクトル



(b) 補正後／補正前の平均スペクトルの比



(c) 標準偏差 (常用対数)

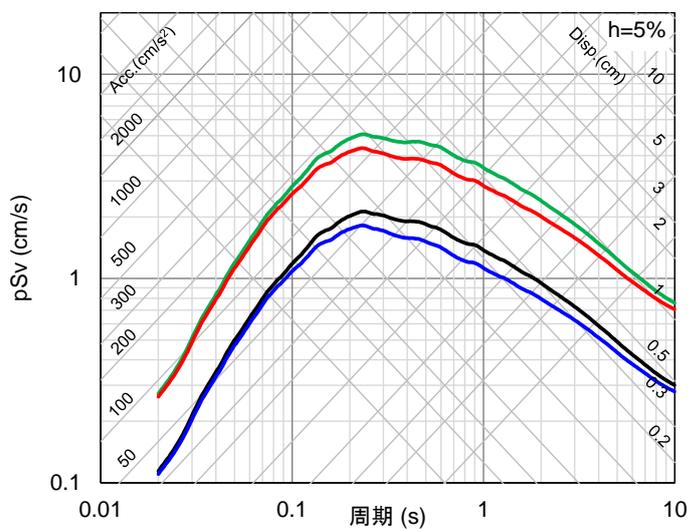


黒:補正前、緑:震源距離のみ補正、青:地盤物性のみ補正、赤:震源距離と地盤物性を補正

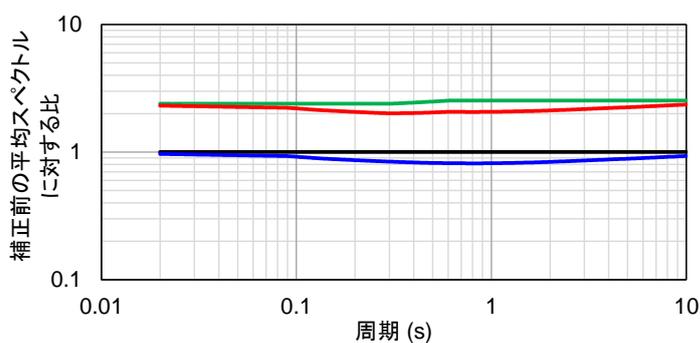
図 4.9 補正前後の水平動の平均スペクトル及び標準偏差の比較

Figure 4.9 Comparison of mean spectra and standard deviations of horizontal ground-motion before and after adjustment

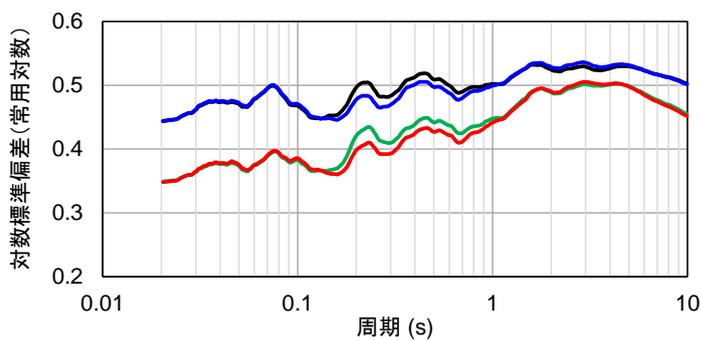
(a) 平均スペクトル



(b) 補正後／補正前の平均スペクトルの比



(c) 標準偏差 (常用対数)



黒:補正前、緑:震源距離のみ補正、青:地盤物性のみ補正、赤:震源距離と地盤物性を補正

図 4.10 補正前後の上下動の平均スペクトル及び標準偏差の比較

Figure 4.10 Comparison of mean spectra and standard deviations of vertical ground-motion before and after adjustment

## 5. 統計処理のデータセットの確認

統計処理では、本研究（追加分）及び従来研究における補正後のはぎとり波からなるデータセット（104 地震の水平 714 記録、上下 355 記録）を使用する。ここでは、データセットの情報の整理及び分析を行い、データの特性を確認した。

### 5.1 情報の整理（ラベル付け）

従来研究と同様に、統計処理に用いるデータセットに対して、その基となった地震及び観測記録に係る 11 項目の特性（表 5.1）に関する情報をラベルとして付加し、それぞれのデータを区別可能な状態に整理した（以下「ラベル付け」という。）。ラベル付け及びそれに基づくグループ分けは、以下のとおり実施し、その結果を表 2.4 に示す。

#### ① 地震規模（ $M_w$ ）

地震規模の指標である  $M_w$  は、F-net<sup>10</sup>による震源メカニズム情報を参照した。解析対象とした 104 地震（従来研究の 89 地震及び追加した 15 地震）の規模別頻度分布を図 2.2 に示す。

#### ② 震源深さ

震源深さの情報は、気象庁一元化震源カタログ<sup>11</sup>を参照した。震源深さのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布を図 5.1 に示す。

#### ③ 地震活動地域（西日本、東日本）

糸魚川－静岡構造線（図 2.1 の薄紫色の破線）を境界に、対象地震の活動（発生）地域を西日本と東日本の 2 地域に分類した。なお、境界付近の地震については、横ずれ断層の地震は西日本に、逆断層の地震は東日本に分類した。地震発生地域のグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布を図 5.2 に示す。

#### ④ 断層タイプ（正断層、逆断層、横ずれ断層）

地震調査研究推進本部による地震活動評価の情報及び F-net による震源メカニズム情報を参考に、対象地震を横ずれ断層・逆断層・正断層の 3 タイプに分類した（図 2.1）。震源メカニズム情報を参考とする場合には、すべり角（ $\lambda$ ）を基準とし、横ずれ断層は  $\lambda=0^\circ\pm 45^\circ$  又は  $180^\circ\pm 45^\circ$ 、逆断層は  $\lambda=90^\circ\pm 45^\circ$ 、正断層は  $\lambda=-90^\circ\pm 45^\circ$  とした。ただし、震源メカニズム解による 2 面のすべり角が異なる断層タイプを示す、複数の異なるタイプの断層面による地震である等の理由により、断層タイプを特定しにくい場合には「判断が難しい地震」に分類した。断層タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布を図 5.3 に示す。

#### ⑤ 地震活動タイプ（本震、余震、前震）

地震調査研究推進本部による地震活動評価の情報を基に、対象地震を本震・前震・余震の3つの地震活動タイプに分類した。地震活動タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布を図 5.4 に示す。

従来研究と同様に、単発で発生した Mw5 クラスの地震は「本震」として分類した。なお、従来研究において、2010年7月4日岩手県内陸南部の地震 (Mw5.0) は、地震調査研究推進本部により 2008年岩手・宮城内陸地震 (Mw6.9) の余震と評価されているが、本震発生から2年間経過しているため「本震」に分類していた。

本研究で追加した地震には、群発地震 (6地震 19記録) も含まれるが、一覧表では「群発地震 (本震)」と表記した上で、ラベル付けに基づくグループとしては「本震」に分類した。これらの群発地震については、付録2において、地域ごとに観測記録の特徴及び統計処理結果への影響を確認した。

#### ⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 (最寄り活断層までの距離)

活断層詳細デジタルマップ<sup>19</sup>の地図上に震央位置を重ね描き、震央距離 40 km 程度以内の範囲において、震央から最も近い「活断層」及び「推定活断層」までの距離 (以下、「最寄り活断層からの距離」及び「推定活断層からの距離」という) をそれぞれ算出した。ここでは、活断層の傾斜、断層面の広がり等を考慮せずに簡易に推定した。最寄り活断層からの距離の算出例を図 5.5 に示す。

なお、「推定活断層」という用語は、活断層詳細デジタルマップにおいて、断層変位地形が最近数十万年前以降 (特に後期更新世以降) に形成されたものかどうかの判定が「活断層」に比べて難しい場合、地形そのものが他の理由 (成因) で形成された可能性があることを示す場合等に用いられている。

#### ⑦ 補正前の震源と観測点の最短距離

図 4.3 に示す5種類の方法 (ケース A~E) により、震源 (断層面又は点震源) を設定し、観測点までの最短距離を算出した。解析対象記録の最短距離 (補正前) 別の頻度分布を図 5.6 に示す。

#### ⑧ 地中地震計位置の地盤の Vs

地中地震計設置位置における地盤の Vs は、KiK-net 観測点の PS 検層結果を参照した。解析対象記録の Vs 別の頻度分布を図 5.7 に示す。

#### ⑨ 地中地震計位置での地震基盤深さ

地中地震計位置における地震基盤の深度は、国立研究開発法人防災科学技術研究所の地震ハザードステーション (J-SHIS)<sup>20</sup> による深部地盤モデルを参照し、各観測点直下の Vs が 3000 m/s 以上となる層の上面深度について整理した。解析対象記録の地震基盤深さ別の頻度分布を図 5.8 に示す。

#### ⑩ 統計処理に用いる地震の数 (記録数)

統計処理に用いる地震数（それに伴う記録数）を増やした場合の地震動強さの平均及び標準偏差（ばらつき）の変化を確認するために、地震数を 20 地震程度ずつ増やして 4 種類のグループに分けた。具体的には、解析対象地震を発生日時順に、30 地震（水平 182 記録、上下 92 記録）、50 地震（水平 331 記録、上下 163 記録）、70 地震（水平 467 記録、上下 230 記録）、104 地震（水平 714 記録、上下 355 記録）を採用した場合の 4 つのデータセットのグループを作成した。

### ⑪ 特徴的な地震動

震源距離及び地盤物性の補正前のはざとり波の応答スペクトルレベルを、既往の距離減衰式<sup>15,21</sup>による推定値と比較して、距離減衰式の推定値を大きく上回る又は下回る（周期 1 秒以下で平均 $\pm 1.5\sigma$ の範囲外の部分がある）はざとり波を「特徴的な地震動」と判断して抽出し、さらに、特徴的なピーク等を生成した要因に応じてグループ分け（Group B～D）を行った（図 5.9）。

Group A：特徴的な地震動ではない

Group B：観測記録そのものに含まれる特徴（自然要因）による特徴的な地震動

Group C：自然要因と人工要因の両者の影響による特徴的な地震動

Group D：はざとり精度が低いこと（人工要因）により生じた特徴的な地震動

ここで、はざとり精度は、地盤モデルを用いた立ち上げた波と地表観測記録の応答スペクトル比を基準とし、周期 1 秒以下で計算／観測比が 1/3～3 倍の範囲外となる周期帯を「はざとり精度が低い」と判断した（3.2 参照）。上下動については、 $V_s$  が 2000m/s 未満の地盤に適用可能な適切な距離減衰式がないため、水平動で特徴的な地震動として抽出された記録を上下動でも特徴的な地震動に分類することとした。

表 5.1 ラベル付けの項目

Table 5.1 Items to label

地震	① 地震規模 (Mw)
	② 震源深さ
	③ 地震活動地域 (西日本、東日本)
	④ 断層タイプ (横ずれ断層、逆断層、正断層)
	⑤ 地震活動タイプ (前震、本震、余震)
	⑥ 震央と活断層の地表における最短距離
観測記録	⑦ 補正前の震源と観測点の最短距離
	⑧ 地中地震計位置の地盤の $V_s$
	⑨ 地中地震計位置での地震基盤深さ
	⑩ 統計処理に用いる地震の数
	⑪ 特徴的な地震動

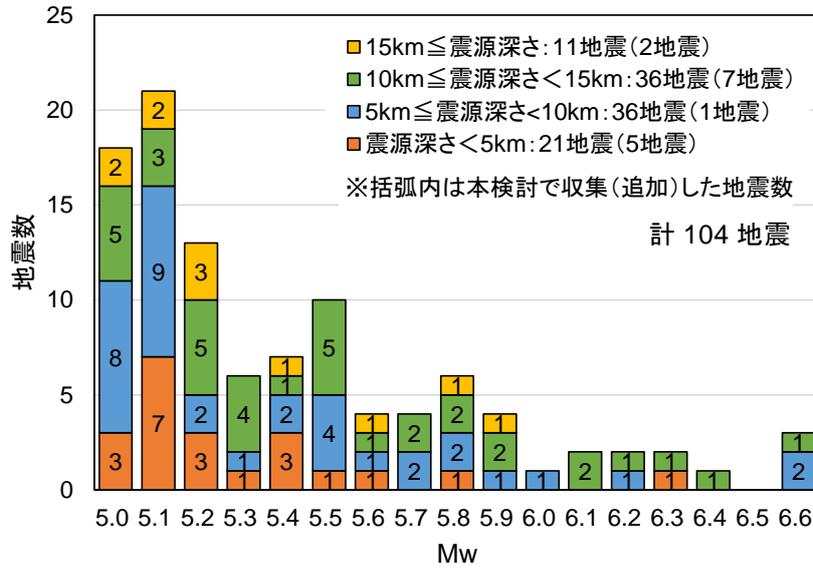


図 5.1 震源深さのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布

Figure 5.1 Frequency distribution of magnitude for analyzed earthquakes color-coded by focal depth group

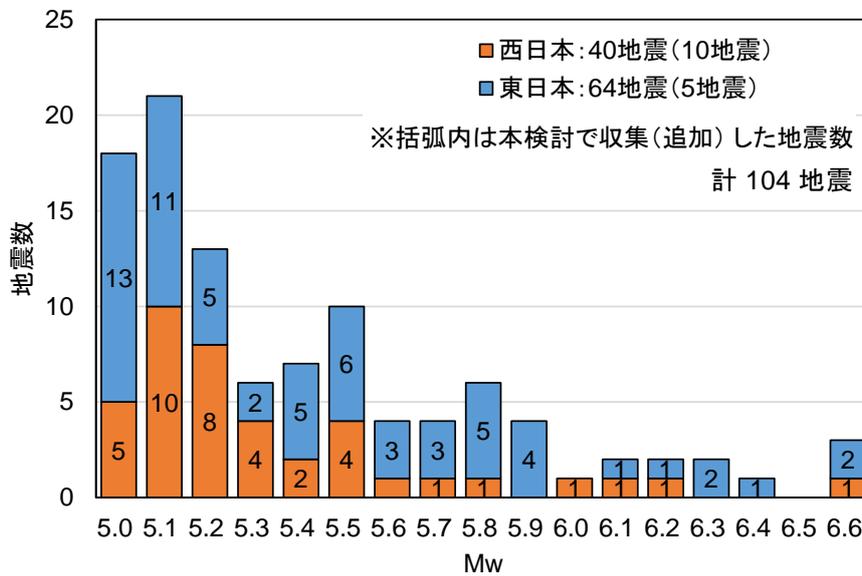


図 5.2 地震発生地域のグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布

Figure 5.2 Frequency distribution of magnitude for analyzed earthquakes color-coded by group of region in which earthquake occurred

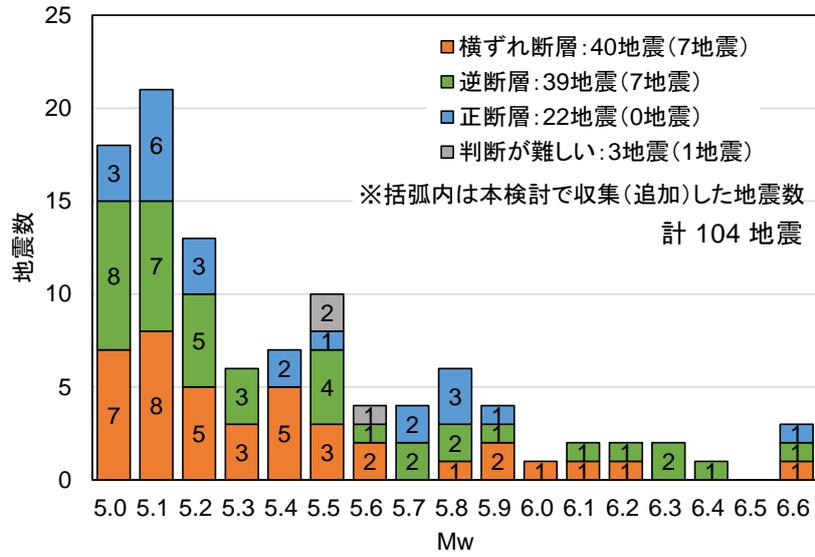


図 5.3 断層タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布  
 Figure 5.3 Frequency distribution of magnitude for analyzed earthquakes color-coded by fault type group

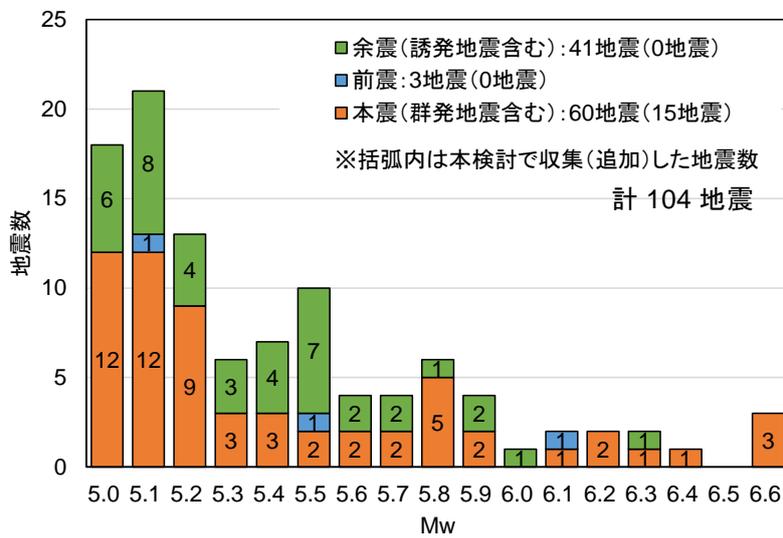
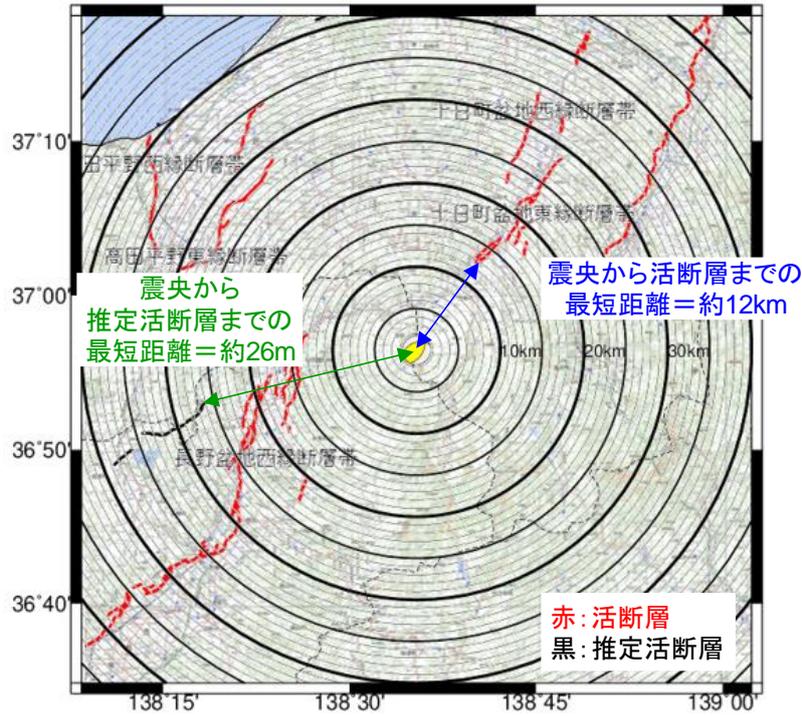
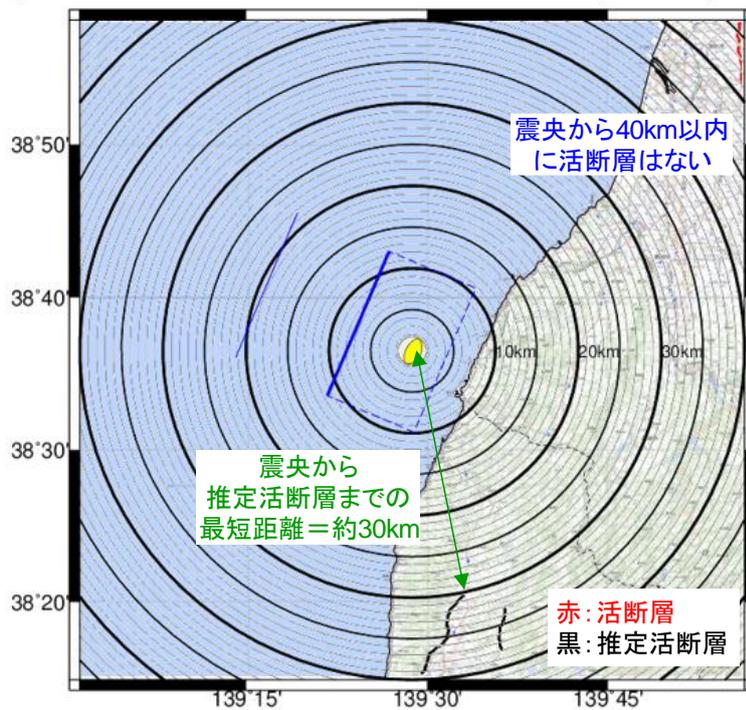


図 5.4 地震活動タイプのグループで色分けした解析対象地震の規模別頻度分布  
 Figure 5.4 Frequency distribution of magnitude for analyzed earthquakes color-coded by group of seismic activity type

(a) 2018年5月25日21:13の長野県北部の地震の例



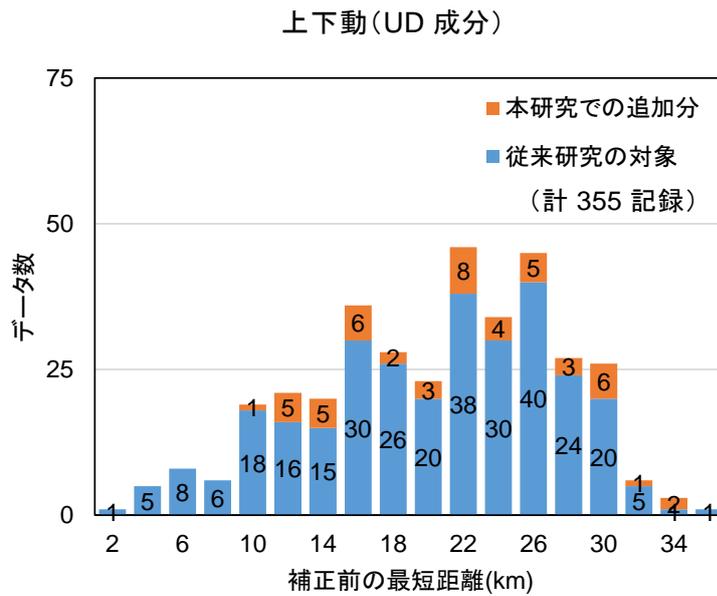
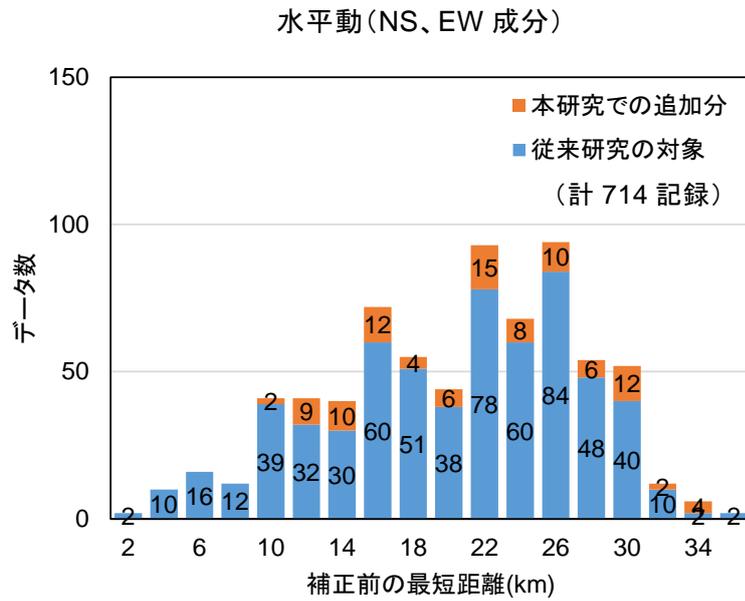
(b) 2019年6月18日22:22の山形県沖の地震の例



出典) 活断層詳細デジタルマップ<sup>19</sup>に加筆

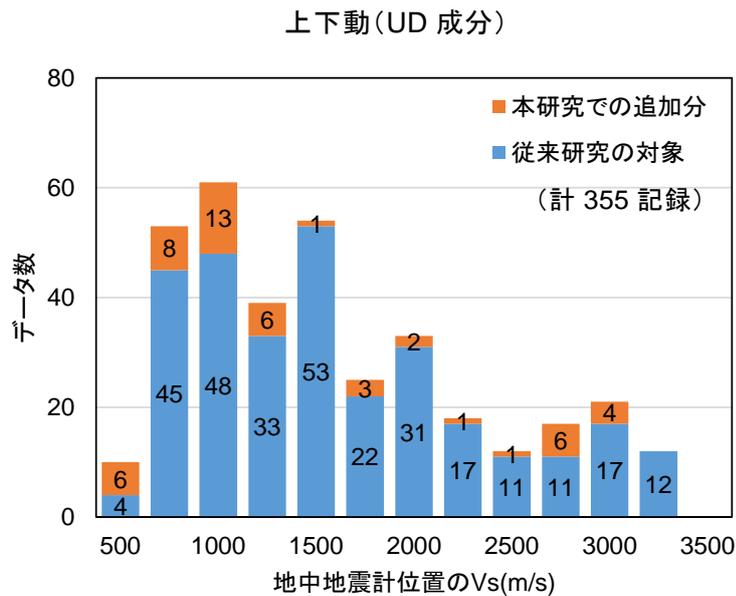
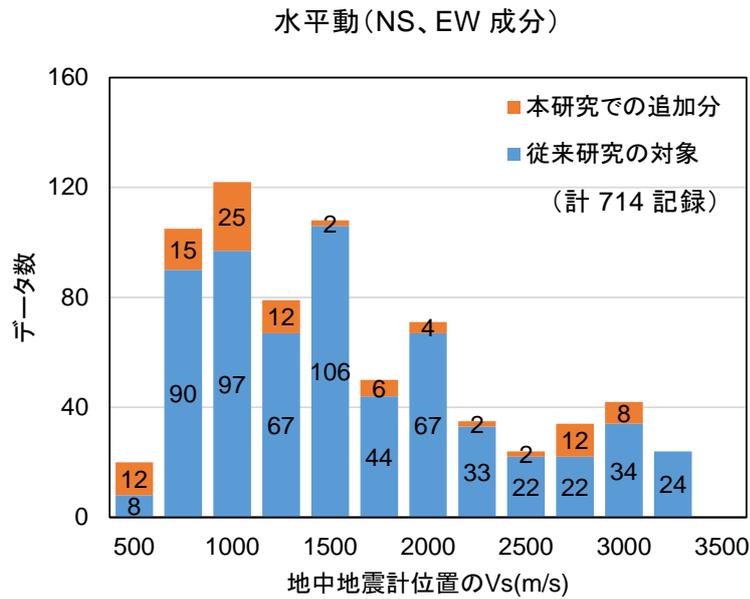
図 5.5 最寄り活断層からの距離の算出例

Figure 5.5 Calculation example of the distance from the nearest active fault



※観測記録の確認・整理において解析対象から除外した記録の成分があるため、3成分(NS, EW, UD)で記録数が異なる。

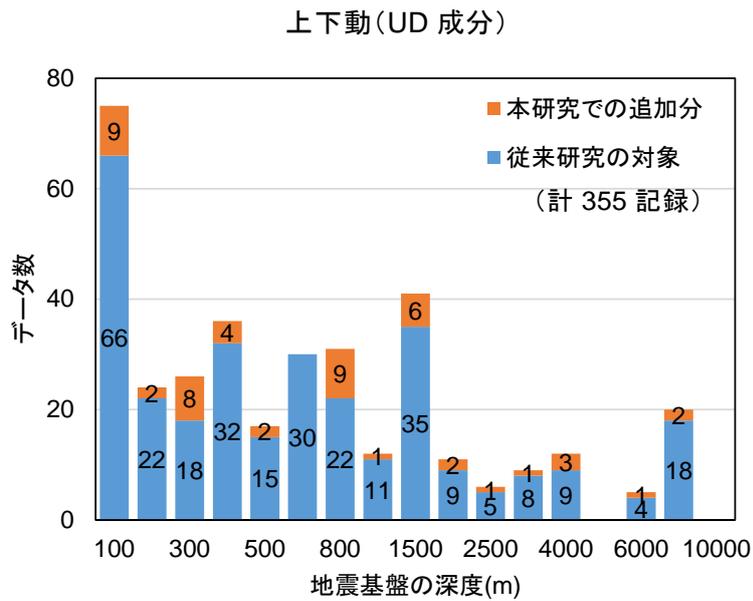
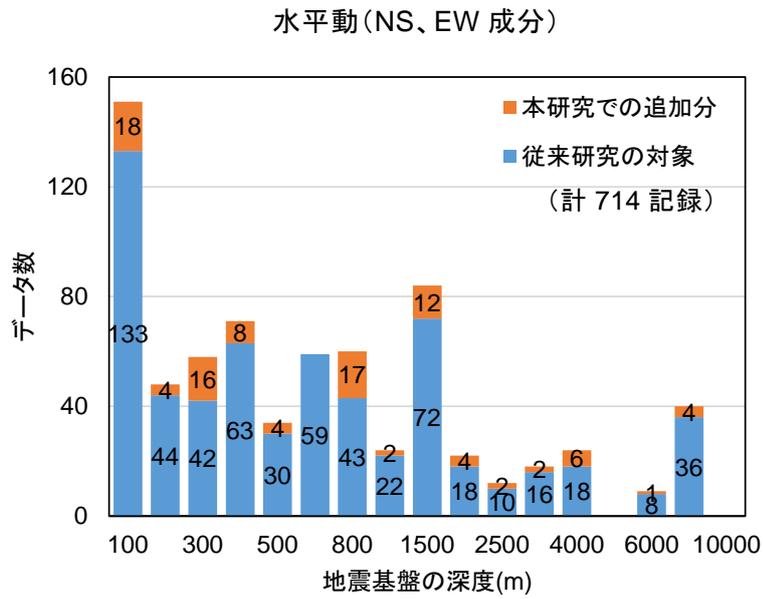
図 5.6 解析対象記録の震源と観測点の最短距離（補正前）別の頻度分布  
Figure 5.6 Frequency distribution of shortest distance between source and station (before adjustment) for analyzed records



※観測記録の確認・整理において解析対象から除外した記録の成分があるため、3成分(NS, EW, UD)で記録数が異なる。

図 5.7 解析対象記録の地中地震計位置の Vs 別の頻度分布

Figure 5.7 Frequency distribution of Vs at the downhole seismometer position for analyzed records



※観測記録の確認・整理において解析対象から除外した記録の成分があるため、3成分(NS, EW, UD)で記録数が異なる。

図 5.8 解析対象記録の地中地震計位置における地震基盤深さ別の頻度分布  
 Figure 5.8 Frequency distribution of depth at the downhole seismometer position for analyzed records

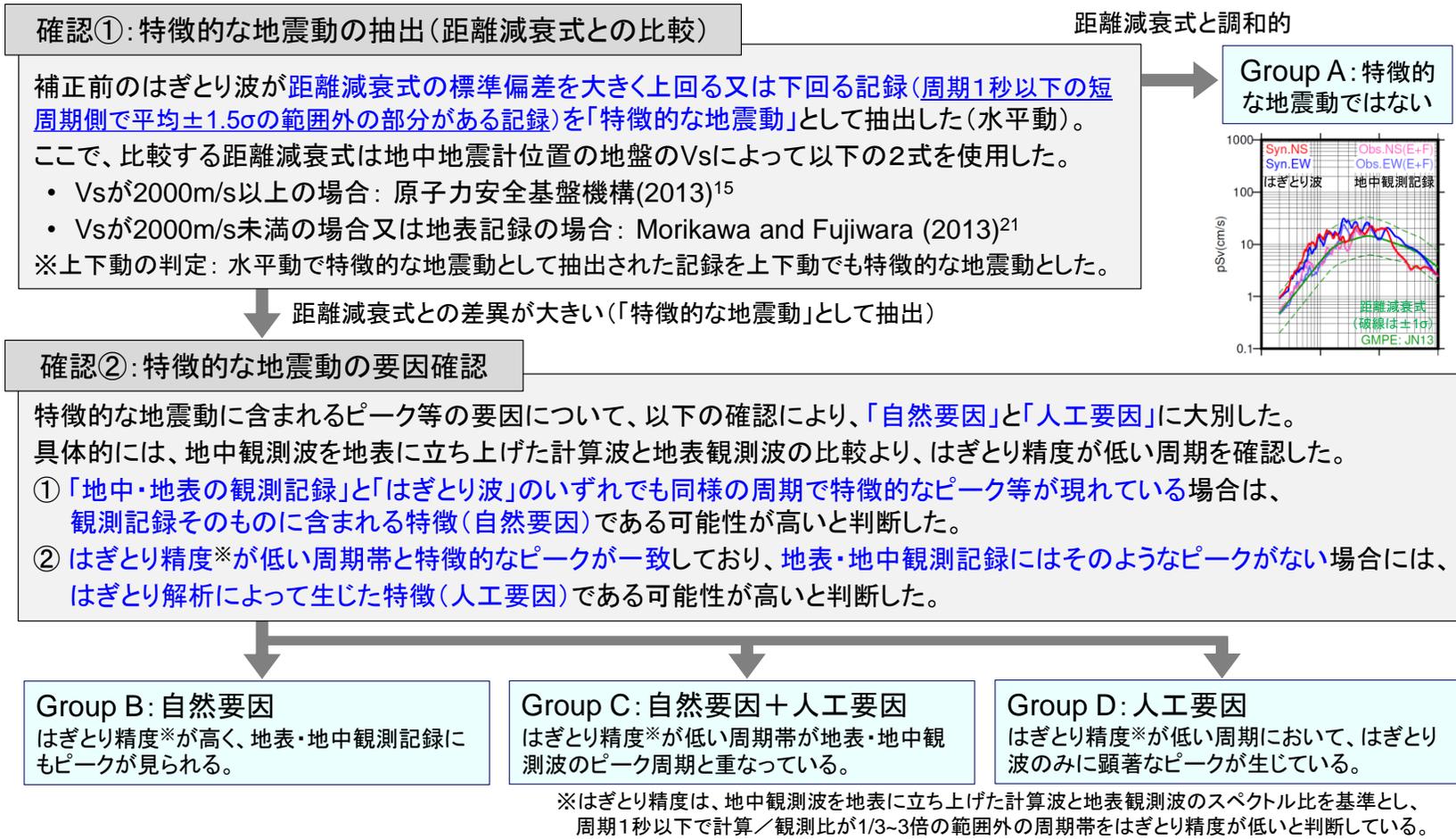


図 5.9 「① 特徴的な地震動」のラベル付けの流れ

Figure 5.9 Process of labeling “① characteristic ground-motion”

## 5.2 確認結果

5.1 で整理した 11 項目のラベル付けに基づき、統計処理に用いるデータセット（はぎとり波の応答スペクトル）を確認した結果の一覧を表 5.2 に示す。図 5.10～図 5. の右側には、本研究（青線）及び従来研究（水色線）のデータセットを合わせてラベル付けに基づくグループごとに分類し、各グループの平均（赤実線）及び標準偏差（平均 $\pm\sigma$ ）（赤破線）を求めて比較した結果を示す。これらの図には共通して、グループ分けをしない全データ（灰色線）の平均（緑実線）及び標準偏差（緑波線）を求めた結果も示す。また、図 5.10～図 5. の左側には、本研究による各グループの平均を重ね描いて比較した結果を示す。

これらの結果より、統計処理に用いるデータセット（データ数）には、極端又は非現実的な偏り等が生じていないことを確認することができた。そこで、本研究では、従来研究と同様に、全国共通に考慮すべき地震動を対象とすることから、統計処理においてはグループごとではなくすべての地震動記録を 1 つのデータセットとして扱うこととした。

表 5.2 ラベル付けによるグループ分けに基づくデータセットの地震動特性の確認結果

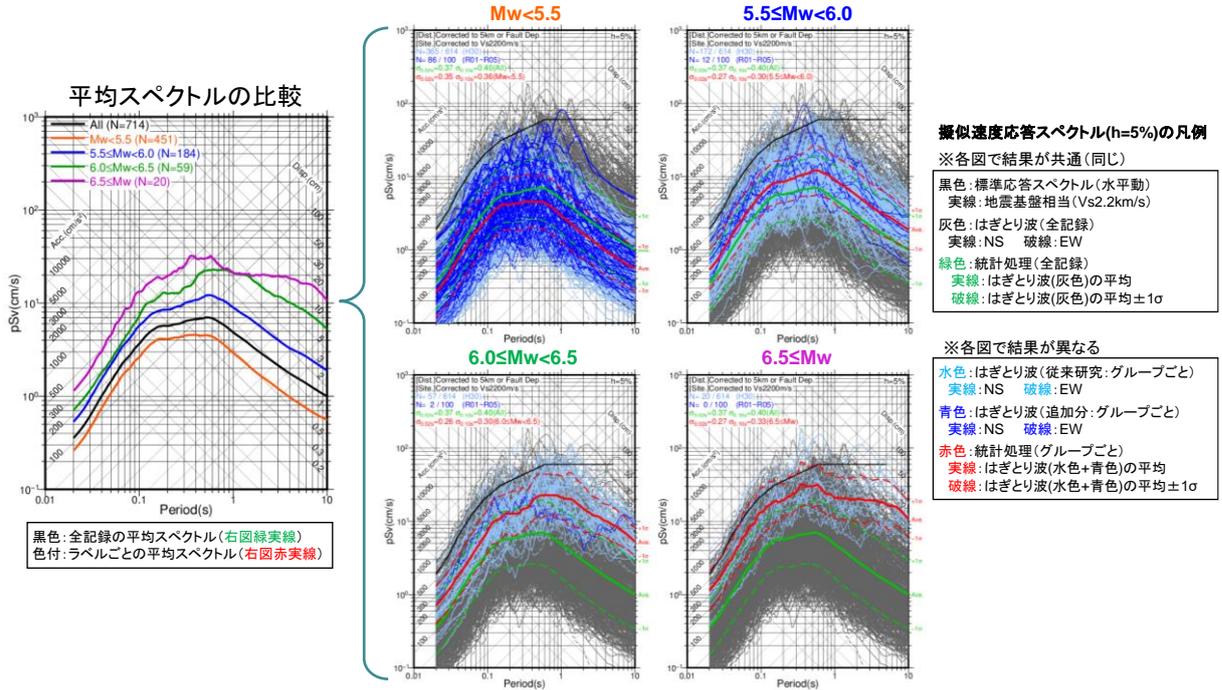
Table 5.2 Confirmation result of the ground-motion characteristics of the data set based on grouping by labeling

項目	確認結果
① 地震規模 (Mw)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・追加した記録を Mw 範囲で分けた 4 グループに分類したところ、Mw5.5 未満の地震の記録が多く、Mw6.5 以上の地震の記録はないことが分かった。追加記録の応答スペクトル (青線) は、従来研究における各グループのばらつき (水色線の帯) の範囲内に概ね収まることが分かった (図 5.10)。ただし、標準応答スペクトルを超える顕著なピークを示す 3 記録については「⑩特徴的な地震動のラベル付け」において要因を確認した。</li> <li>・従来研究と追加分の記録 (青線・水色線) を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルは、地震規模補正は実施していないため、規模が大きいほど地震動レベルが大きくなる傾向 (長周期になるほど顕著) があるものの、周期 0.6 秒程度以下では Mw5.5 未満のグループにも地震動レベルが大きい記録もあることを確認した。</li> <li>・データ数については、Gutenberg-Richter (G-R) 則<sup>22</sup>に従い地震規模が小さいほど多くなる傾向があり、現実的な偏りが生じていることを確認し、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
② 震源深さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・追加した記録の応答スペクトル (青線) を震源深さの範囲による 4 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき (水色線の帯) の範囲内に概ね収まることが分かった (図 5.11)。ただし、震源深さ 5 km 未満では全記録の平均に対して地震動が小さい記録が多いが、震源深さ 10~15 km は大きい記録が多い。</li> <li>・従来研究と追加分の記録 (青線・水色線) を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルは、グループ内に規模が小さい地震が多い震源深さ 15 km 以深を除いて、大きな差異は見られないものの、震源深さが浅い (5 km 未満の) グループでは周期 1 秒程度以下の地震動レベルがやや小さい傾向があることを確認した。これには、応力降下量の深さ依存性が影響している可能性が考えられる。</li> <li>・データ数については、中間的な震源深さ (10 km 前後) のデータが多くなる傾向があるものの、極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
③ 地震活動地域 (西日本、東日本)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・追加した記録の応答スペクトル (青線) を地震の発生位置に応じて西日本と東日本の 2 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき (水色線の帯) の範囲内に概ね収まることが分かった (図 5.12)。</li> <li>・従来研究と追加分の記録 (青線・水色線) を合わせて算出した西日本と東日本の 2 グループの平均スペクトルは、概ね同等のレベルであることを確認した。</li> <li>・データ数にも極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
④ 断層タイプ (横ずれ断層、 逆断層、正断層)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・追加した記録の応答スペクトル (青線) を断層タイプ (横ずれ断層、逆断層、正断層) に応じた 3 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき (水色線の帯) の範囲内に概ね収まることが分かった (図 5.13)。</li> <li>・従来研究と追加分の記録 (青線・水色線) を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルのレベルは、周期 0.6 秒程度よりも長周期側ではほぼ同等であるが、それよりも短周期側では逆断層がやや大きい傾向があることを確認した。</li> </ul>

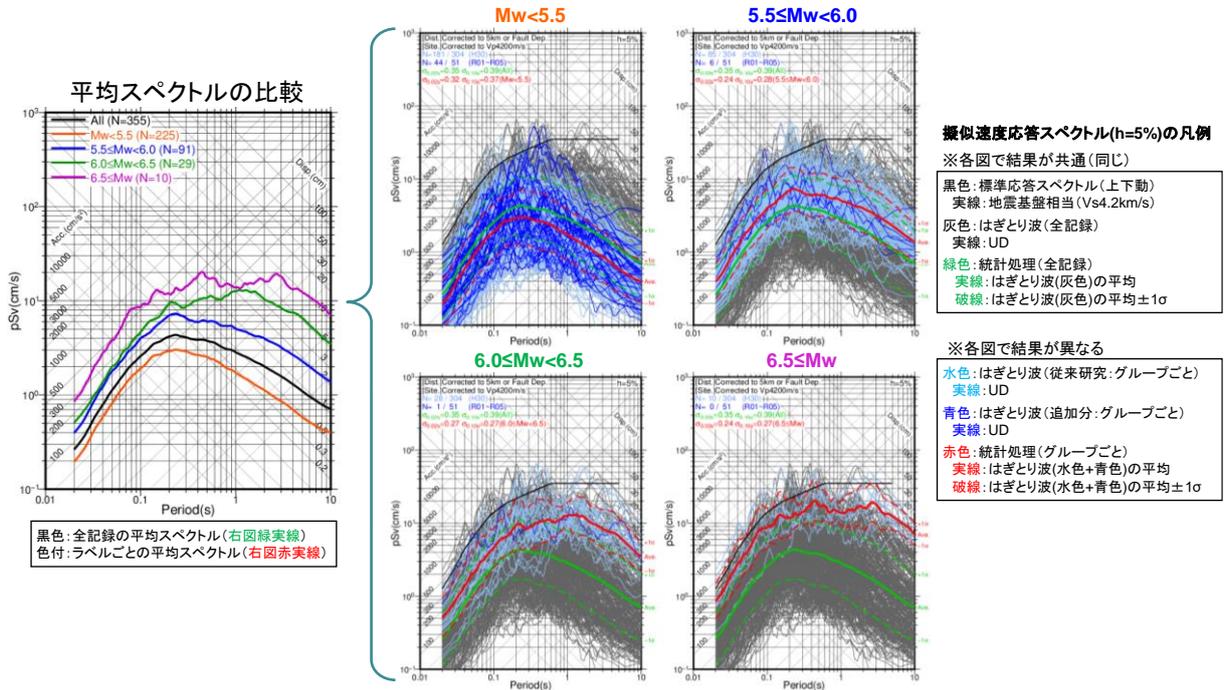
	<ul style="list-style-type: none"> <li>データ数については、横ずれ断層と逆断層は同等であり、正断層では少ない傾向があり、極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
⑤ 地震活動タイプ (前震、本震、余震)	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した地震の活動タイプは本震のみであった。なお、群発地震も本震のグループに含めた(表 2.4 の地震一覧においては「群発地震(本震)」とした)上で、付録 2 において、地域ごとに観測記録の特徴及び統計処理結果への影響を確認した。追加した記録の応答スペクトル(青線)は、従来研究における各グループのばらつき(水色線の帯)の範囲内に概ね収まっている(図 5.14)。</li> <li>従来研究と追加分の記録(青線・水色線)を合わせてグループごとに算出した平均スペクトル及びばらつきは、本震と余震ではほぼ同等のレベルであることを確認した(前震はデータ数が顕著に低いので比較対象から除外)。</li> <li>その上で、統計処理上のデータ数を確保するために、本震以外の余震と前震の記録もすべて1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
⑥ 震央と活断層の 地表における最短 距離	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した記録の応答スペクトル(青線)を活断層の傾斜や断層面の広がりなどを考慮せずに簡易に推定した「対象地震の震央と活断層の最短距離」に応じた 3 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき(水色線の帯)の範囲内に概ね収まることが分かった(図 5.15、図 5.16)。</li> <li>従来研究と追加分の記録(青線・水色線)を合わせてグループごとに算出した平均スペクトル及びばらつきについては、3 グループのうち周辺に活断層がない場合(距離 15 km 以遠)の地震動の平均スペクトルは周期 0.3 秒程度以下の短周期側ではやや大きくなるが(図 5.15)、ばらつき(標準偏差)は小さくなる傾向があること、また、推定活断層を含む場合には周期 0.1 秒程度以下の短周期側における平均スペクトルはほぼ同等となることを確認した(図 5.16)。なお、長周期側の差異はグループ内に含まれる地震規模が比較的小さいことが影響していると考えられる。</li> <li>各グループのデータ数については、極端な偏りはないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
⑦ 補正前の震源と 観測点の最短距離	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した記録の補正後の応答スペクトル(青線)を「補正前の震源と観測点の最短距離」に応じた 4 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき(水色線の帯)の範囲内に概ね収まることが分かった(図 5.17)。</li> <li>従来研究と追加分の記録(青線・水色線)を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルについて、震源距離補正の対象となる最短距離 5 km 以遠の 3 グループでは地震動レベルの差異が小さくなっており、補正の効果が現れていることを確認した。ただし、補正前の最短距離が近いグループほど平均スペクトルが大きくなる傾向があるため、データの分析を行った。その結果、地震規模(<math>M_w</math>)が大きくなるほど断層面積が大きくなり近距離の記録が増えるため、補正前の最短距離で分けた各グループに含まれる地震の <math>M_w</math> に差異が生じ、それにより平均スペクトルにも差異が生じていることが分かったため、現実的な傾向であると判断した。</li> <li>データ数については、震央距離 30 km 以内の記録を収集しているので、補正前の最短距離が遠い記録ほど多くなる傾向はあるが、震源距離補正を実施しているため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
⑧ 地中地震計位置の 地盤の $V_s$	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した記録の応答スペクトル(青線)を「地中地震計位置の地盤の <math>V_s</math>」に応じた 4 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき(水色線の帯)の範囲内に概ね収まることが分かった(図 5.18)。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来研究と追加分の記録（青線・水色線）を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルについては、大きな差異は見られないことから、平均レベルに対する地盤物性補正が問題なく施されていることを確認した。一方で、各グループのばらつき（標準偏差）については、地中地震計位置の地盤の <math>V_s</math> が小さくなるほどばらつきが大きくなる傾向があり、統計処理に用いる地震動のデータセットに、地震基盤相当よりも <math>V_s</math> が小さい地盤の記録を含めることにより、ばらつき（標準偏差）を過大評価する可能性があることが分かった。</li> <li>なお、地中地震計位置の <math>V_s</math> が元々地震基盤相当に近いデータのみを用いた場合には、統計処理に用いるデータ数が少なくなることから、そのようなデータのみを用いた統計処理結果は標準応答スペクトルの設定の際には不採用となった。</li> </ul>
<p>⑨ 地中地震計位置での地震基盤深さ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した記録の応答スペクトル（青線）を「地中地震計位置から地震基盤面までの深さ」に応じた 4 グループに分類した結果、従来研究における各グループのばらつき（水色線の帯）の範囲内に概ね収まることが分かった（図 5.19）。</li> <li>従来研究と追加分の記録（青線・水色線）を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルについては、大きな差異は見られないことを確認した。</li> <li>データ数についても極端又は非現実的な偏りは生じていないため、1つのデータセットとして扱うこととした。</li> </ul>
<p>⑩ 統計処理に用いる地震の数</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>統計処理に用いる地震数を発生時刻順に最初の 30 地震から 20 地震ずつ（記録は 150 波程度ずつ）増やしていくことにより、4つのデータセットを作成して比較したところ、大きな差異は見られず、特に約 70 地震を超えると平均と標準偏差はほぼ同等となることを確認した（図 5.20）。したがって、104 地震の記録を使用している本研究の統計処理の値は安定しているものと考えられる。なお、本研究で追加した記録は、90～105 番目に該当するため、すべて「104 地震」のグループに含まれる。</li> </ul>
<p>⑪ 特徴的な地震動</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加した記録のうち、一部周期帯で標準応答スペクトルを超える 3 記録は、水平動では人工要因により生じた特徴的な地震動（Group C, D）に分類したが、上下動では特徴的な地震動ではない（Group A）に分類されたものもあった（図 5.）。これには、<math>V_s</math> 2000 未満の地盤の上下動に適用可能な距離減衰式がないために、特徴的な地震動であるか否か（Group A かそれ以外か）の判断において、水平動の結果を流用したことが要因と考えられるため、個別に確認したところ、顕著なピークははざより精度が低いこと（人工要因）により生じていることを確認した。</li> <li>従来研究と追加分の記録（青線・水色線）を合わせてグループごとに算出した平均スペクトルについては、データや数が少なく直接比較が難しい Group C を除いては、大きな差異は見られないが、特徴的な地震動（Group B~D）のばらつきは大きくなる傾向があることを確認した。また、上下動については、人工要因による特徴的な地震動の割合が高く、水平動よりもはざより精度が低い傾向があることが分かった。</li> <li>統計処理においては、人工要因の寄与がある Group C, D については重みを下げた場合の影響を確認することとした（詳細は 6.1 参照）。</li> </ul>

<水平動>



<上下動>

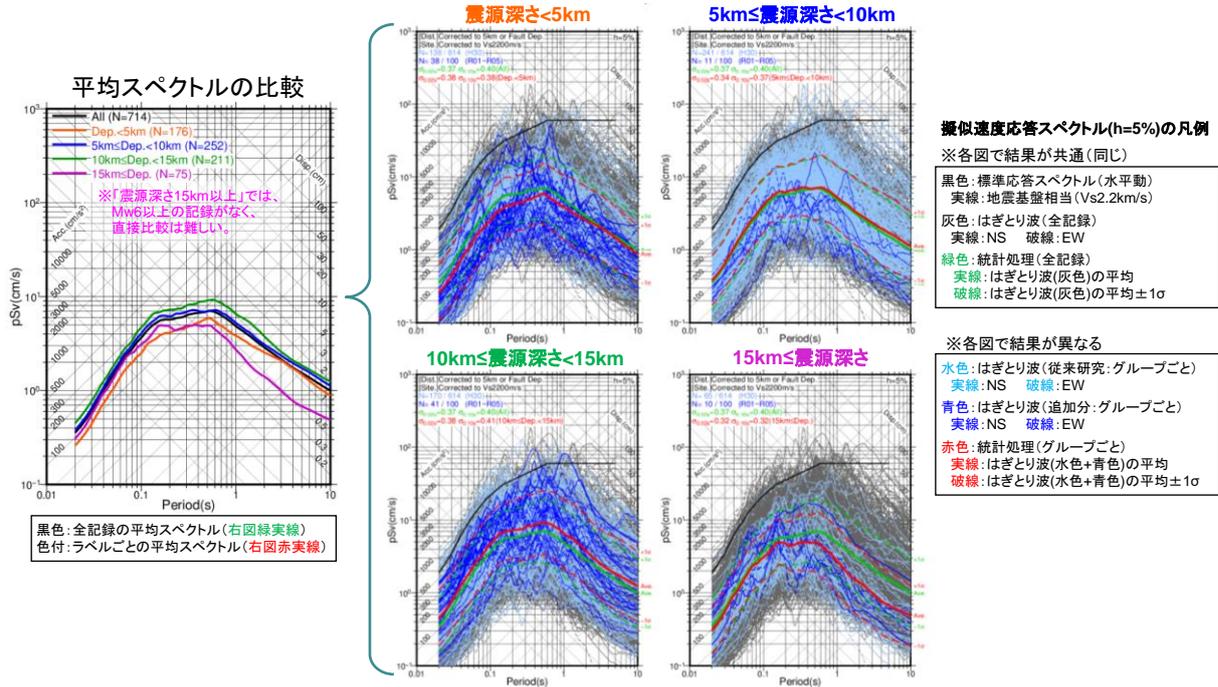


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

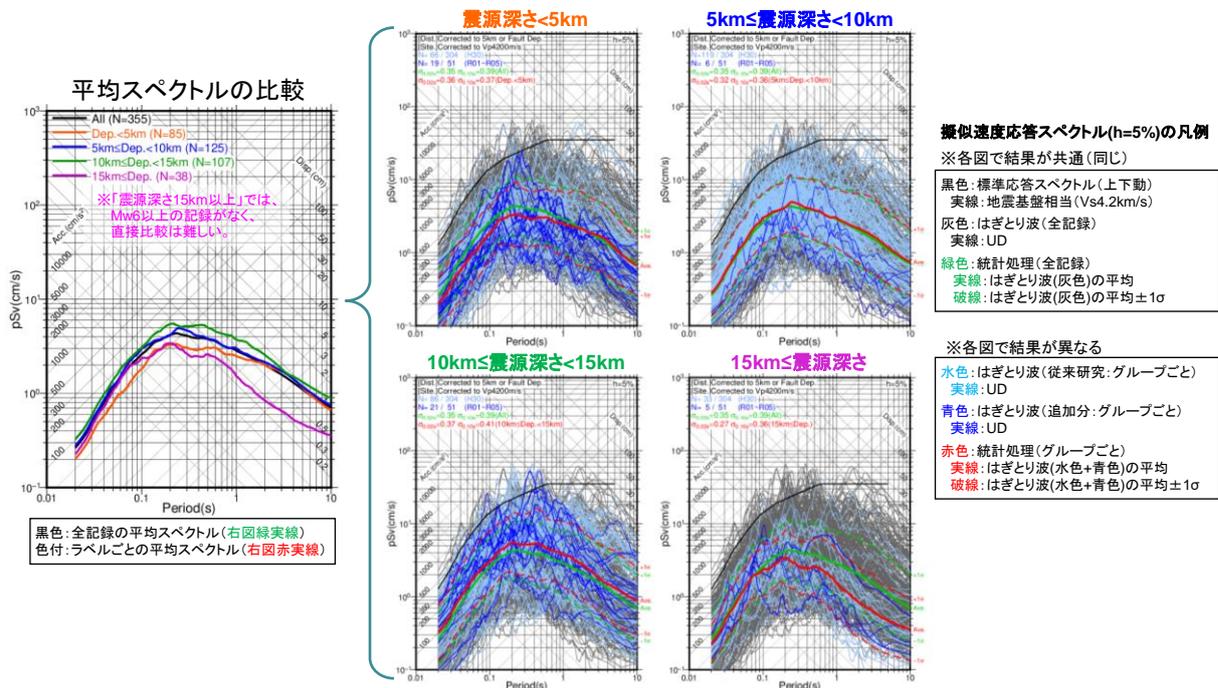
図 5.10 「① 地震規模 (Mw)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.10 Comparison of response spectra for each group based on labeling “① magnitude of earthquake (Mw)”

＜水平動＞



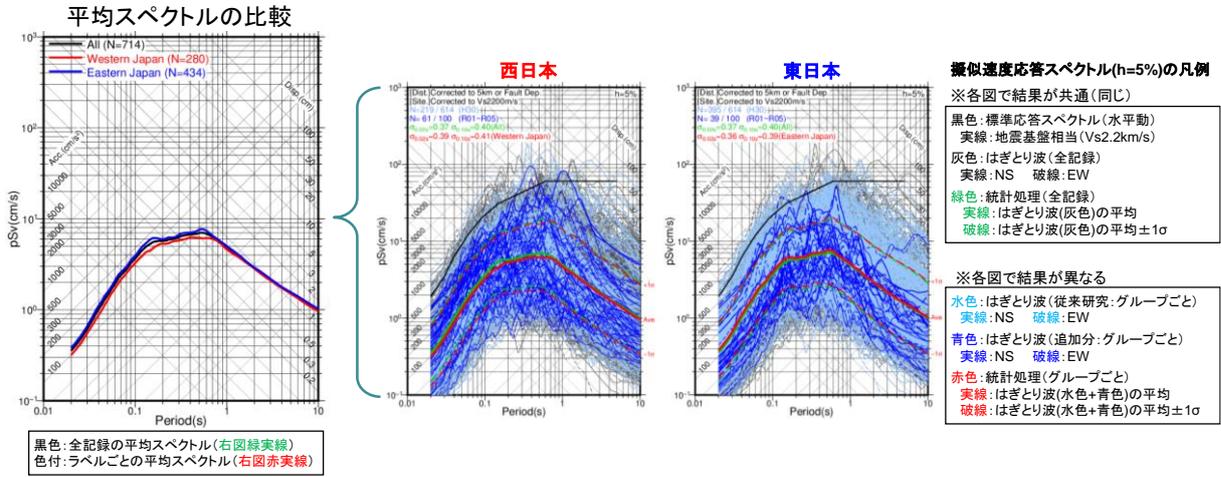
＜上下動＞



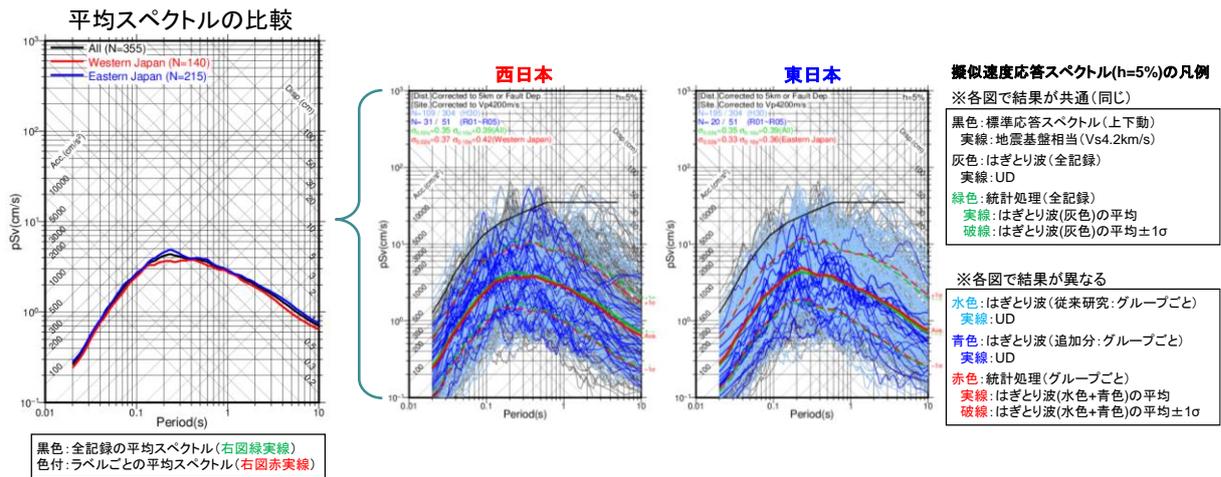
※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

図 5.11 「② 震源深さ」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較  
Figure 5.11 Comparison of response spectra for each group based on labeling “② focal depth”

＜水平動＞



＜上下動＞

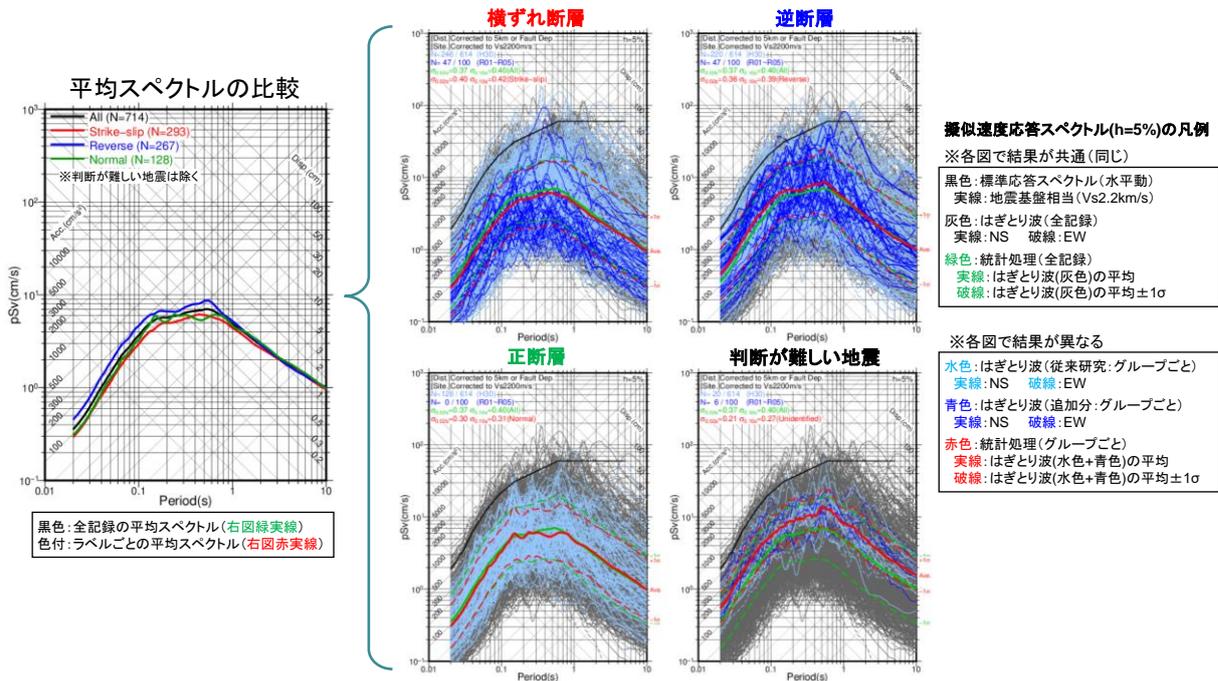


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

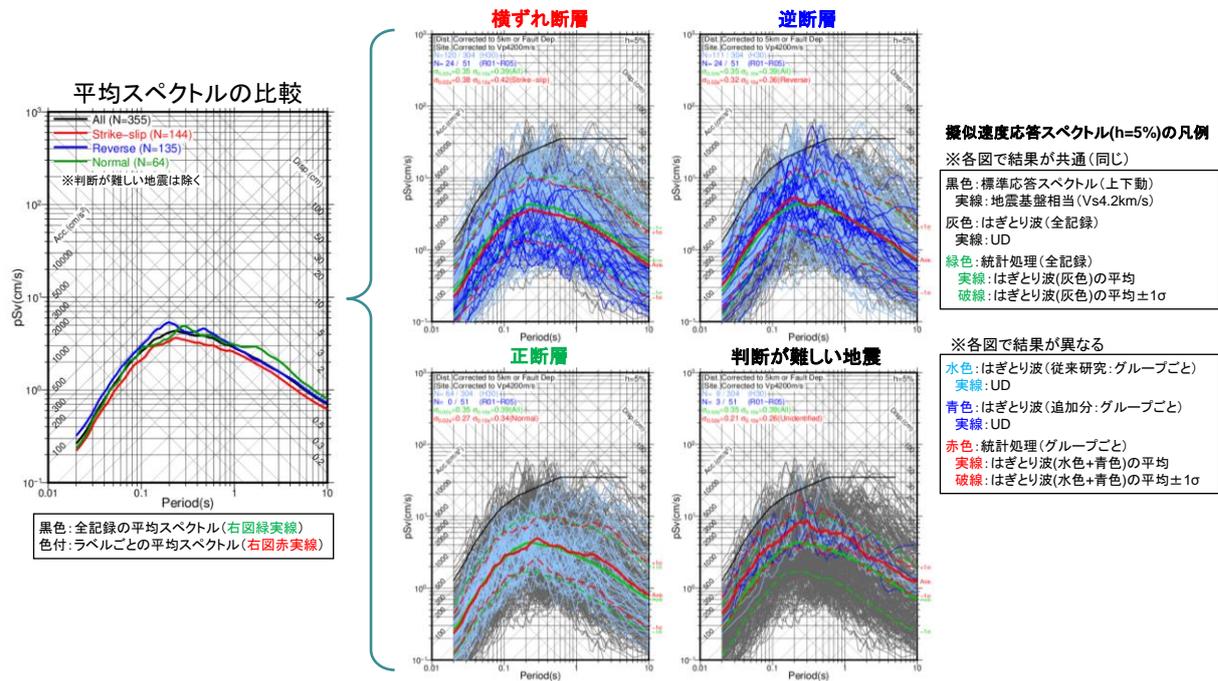
図 5.12 「③ 地震活動地域 (西日本、東日本)」のラベル付けに基づくグループごとの  
 応答スペクトルの比較

Figure 5.12 Comparison of response spectra for each group based on labeling “③ seismic  
 activity area (Western Japan and Eastern Japan)”

＜水平動＞



＜上下動＞

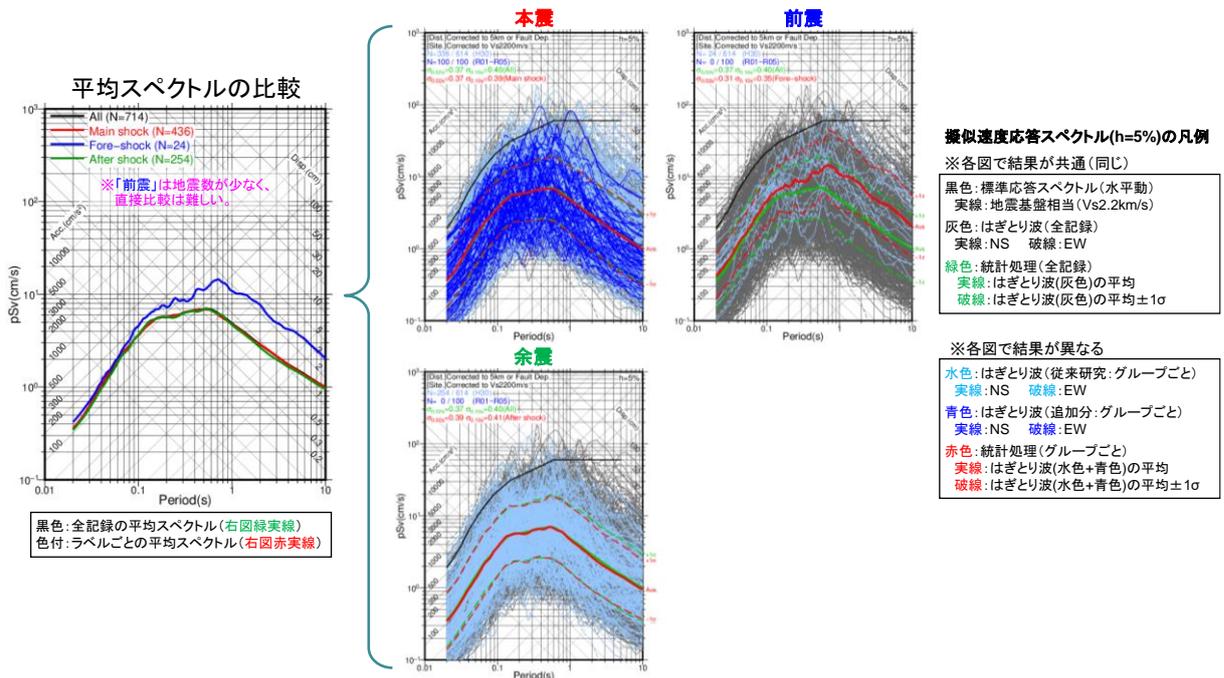


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

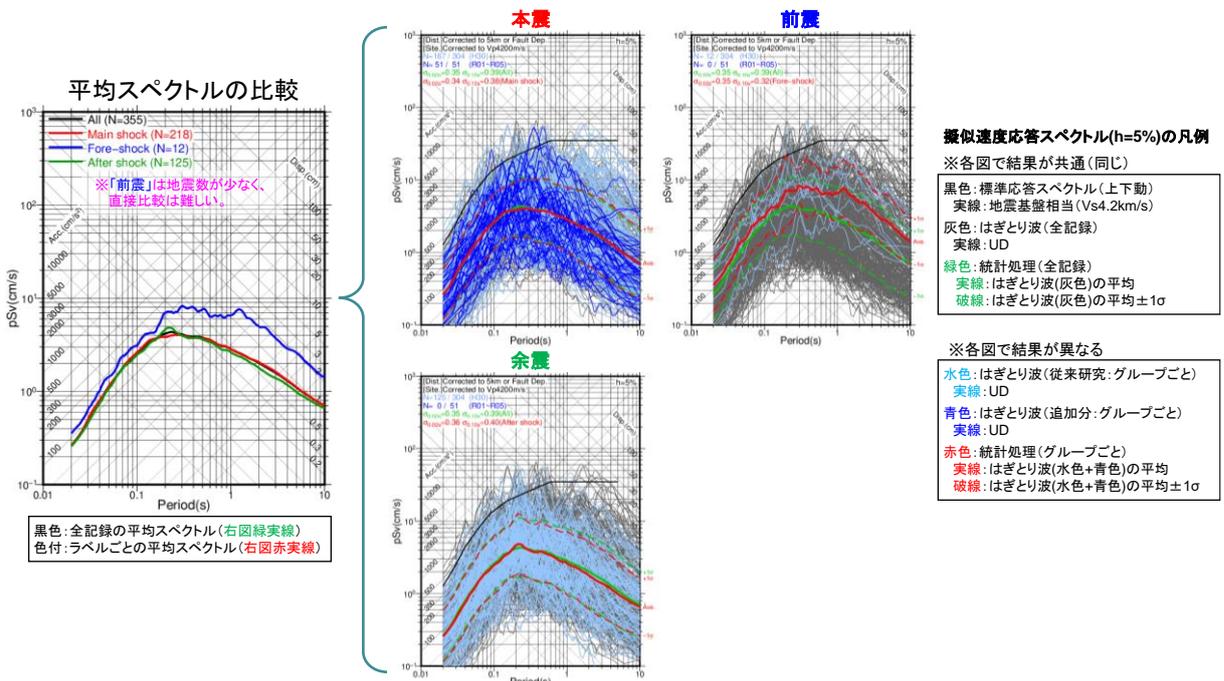
図 5.13 「④ 断層タイプ (横ずれ断層、逆断層、正断層)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.13 Comparison of response spectra for each group based on labeling “④ fault type (strike-slip fault, reverse fault, and normal fault)”

＜水平動＞



＜上下動＞

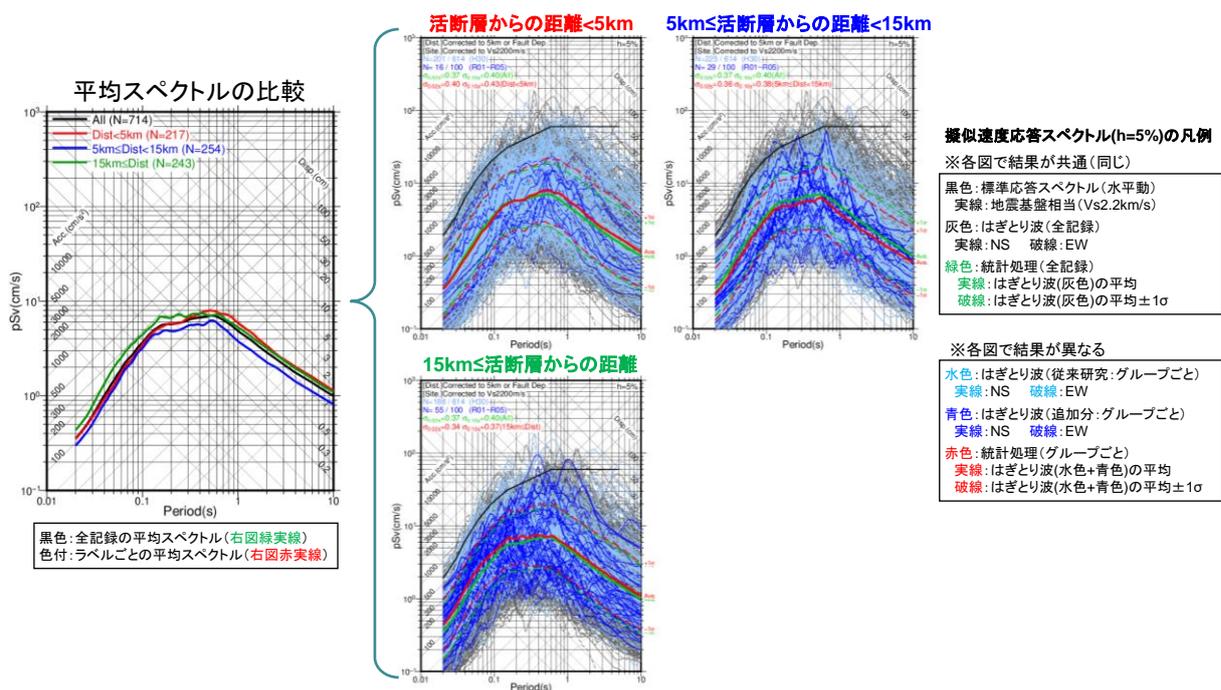


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

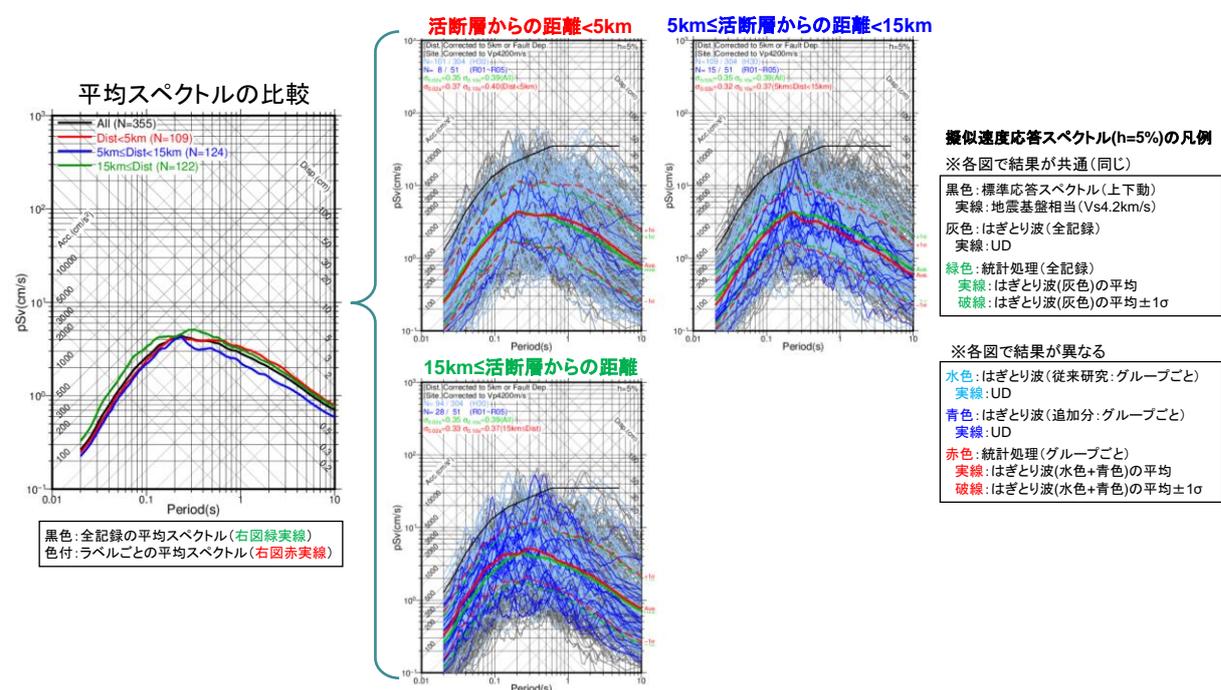
図 5.14 「⑤ 地震活動タイプ (前震、本震、余震)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.14 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑤ seismic activity type (foreshocks, mainshocks, and aftershocks)”

<水平動>



<上下動>

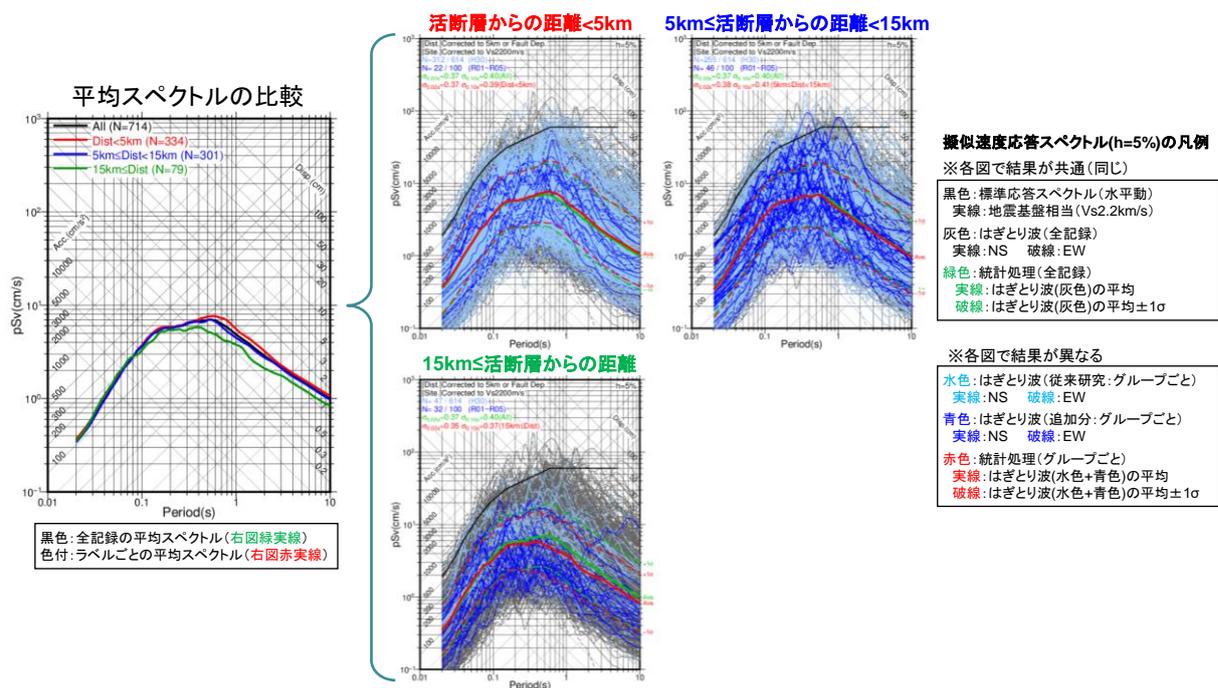


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

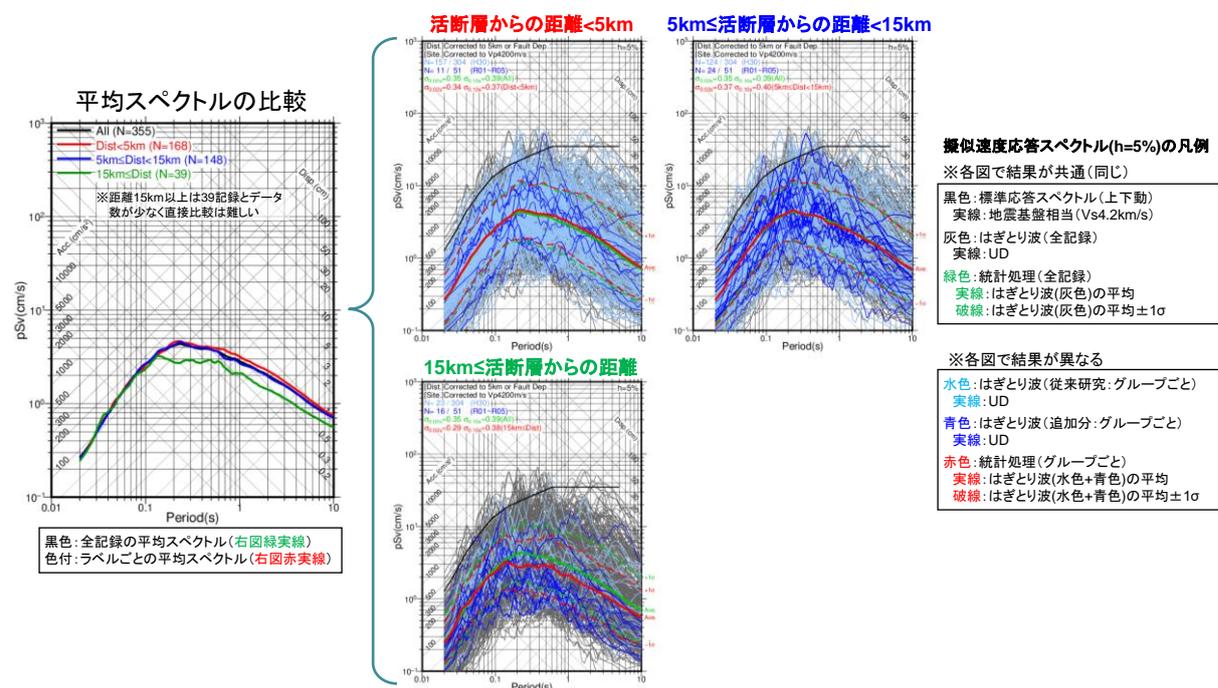
図 5.15 「⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 (活断層のみ)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.15 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑥ shortest distance on the surface between epicenter and active fault (active fault only)”

＜水平動＞



＜上下動＞

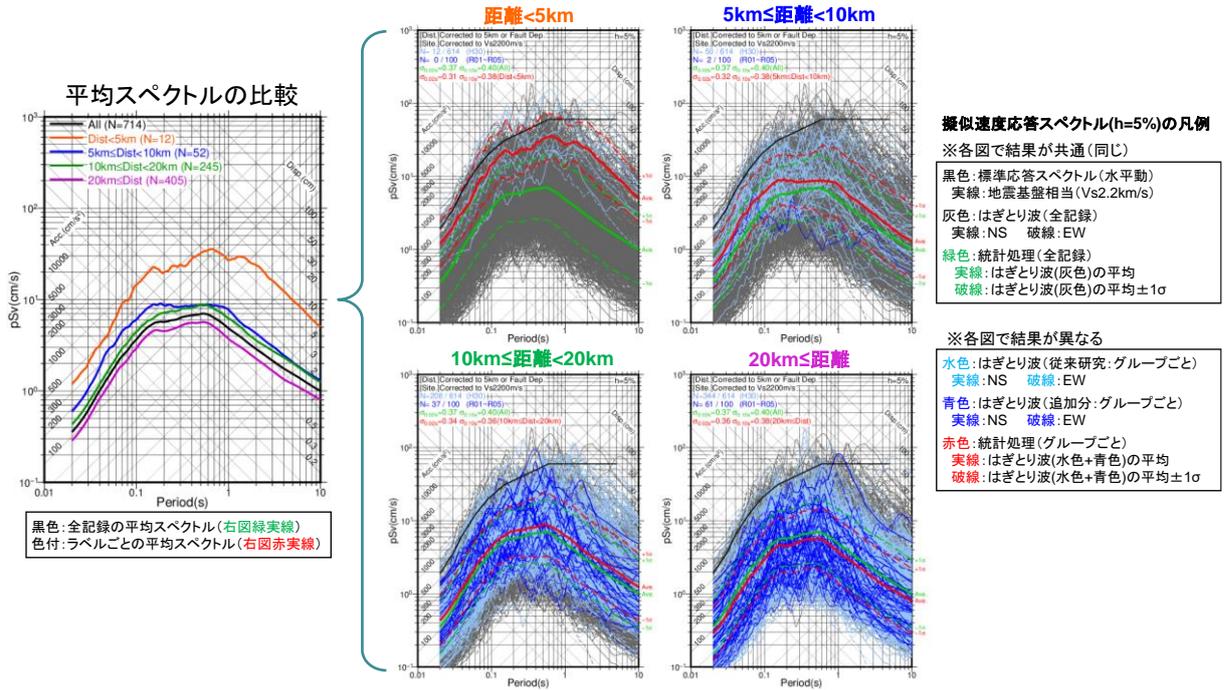


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

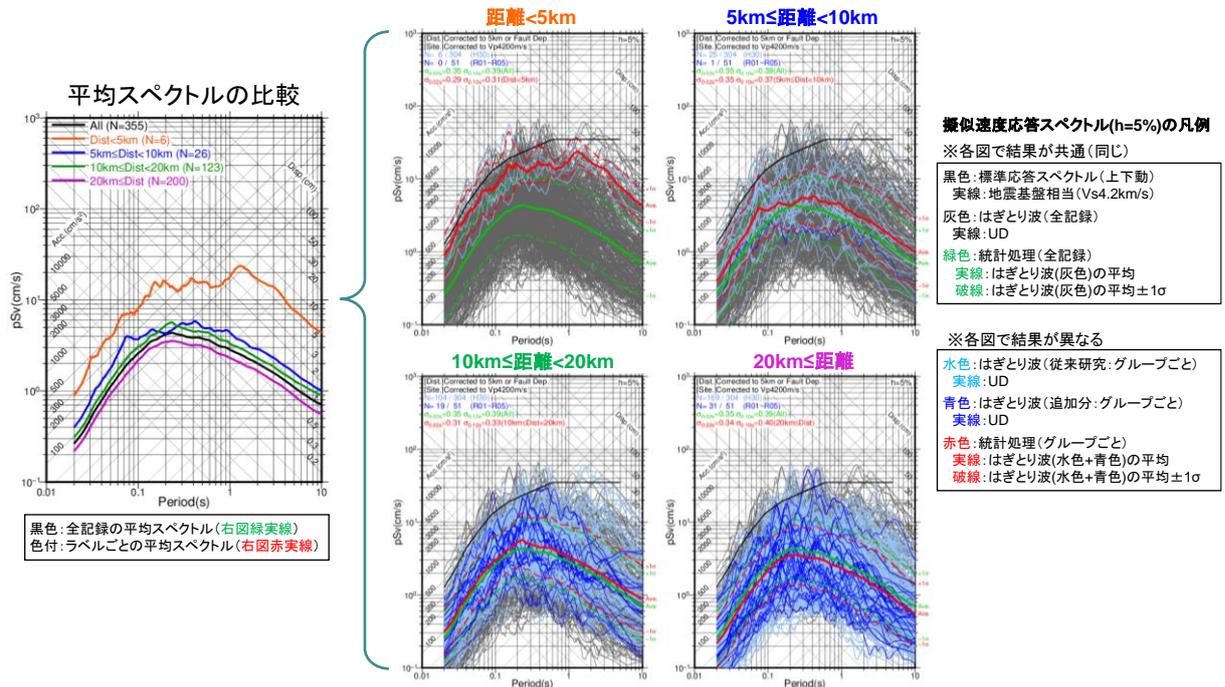
図 5.16 「⑥ 震央と活断層の地表における最短距離 (活断層又は推定活断層)」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.16 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑥ shortest distance on the surface between epicenter and active fault (active fault or presumed active fault)”

＜水平動＞



＜上下動＞

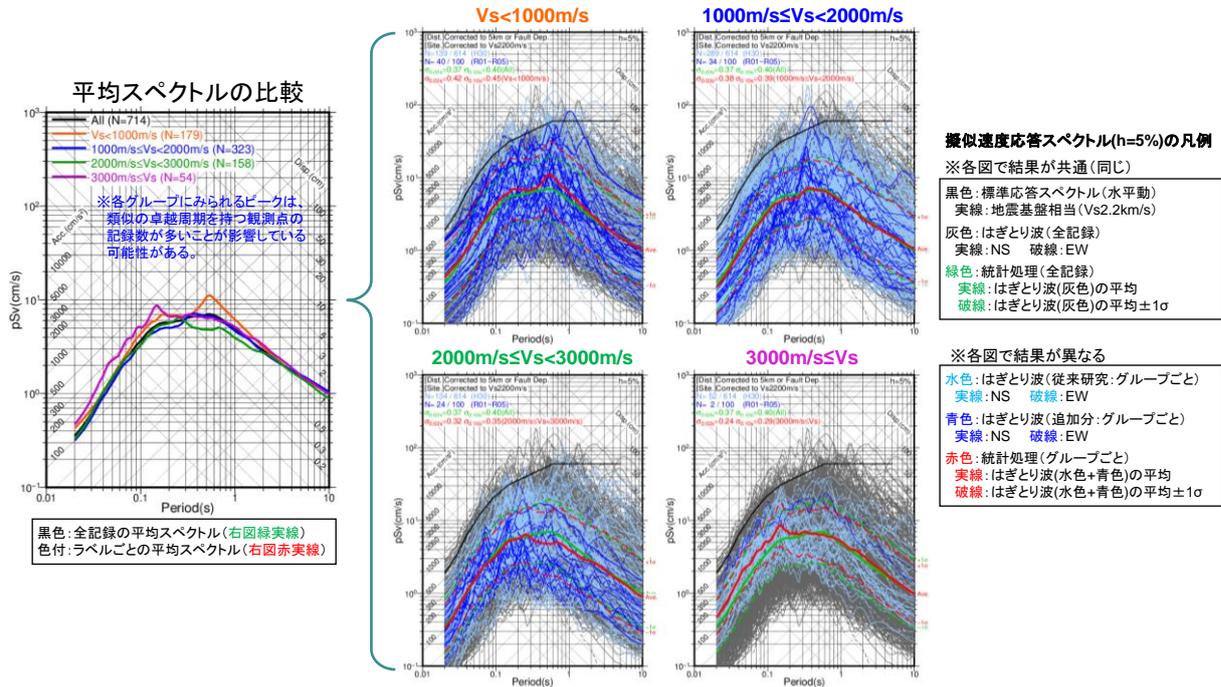


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

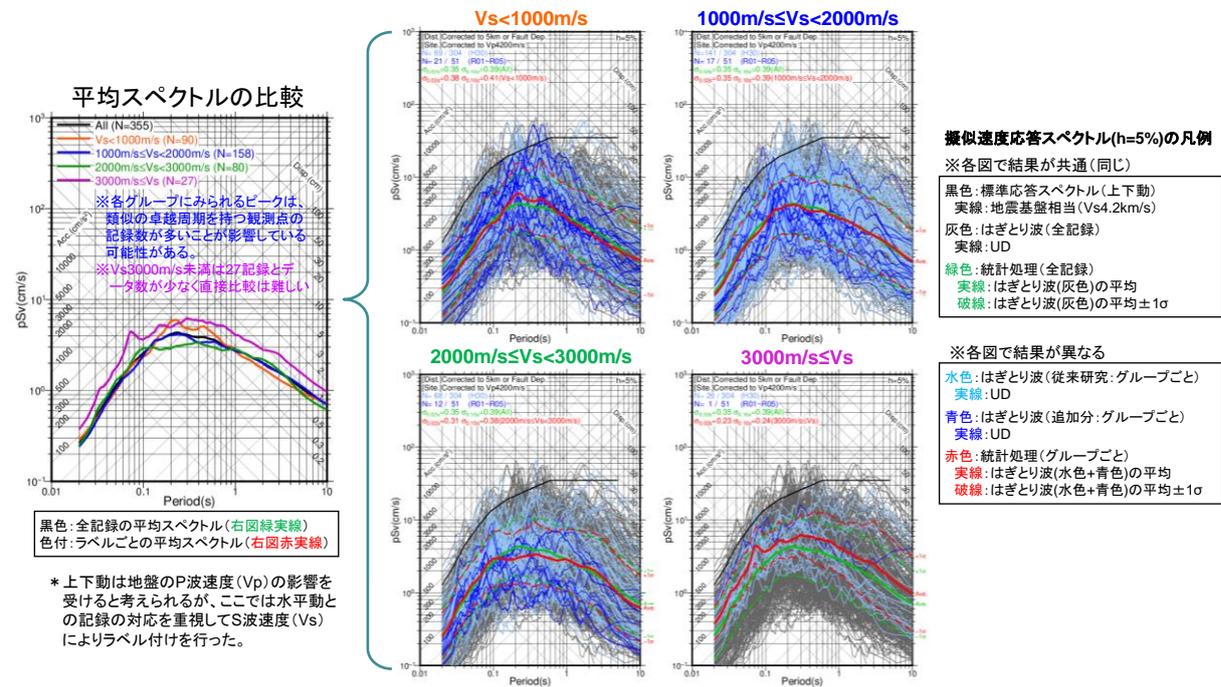
図 5.17 「⑦ 補正前の震源と観測点の最短距離」のラベル付けに基づくグループごとの  
応答スペクトルの比較

Figure 5.17 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑦” shortest  
distance between source and station before adjustment”

＜水平動＞



＜上下動＞

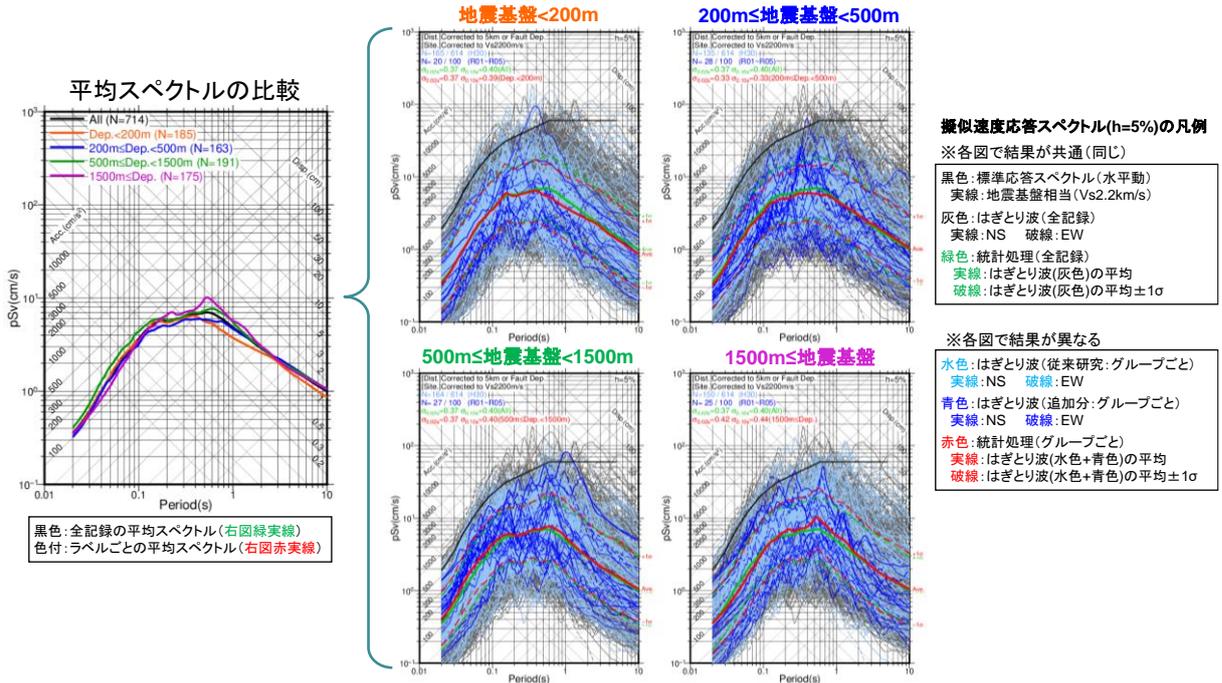


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

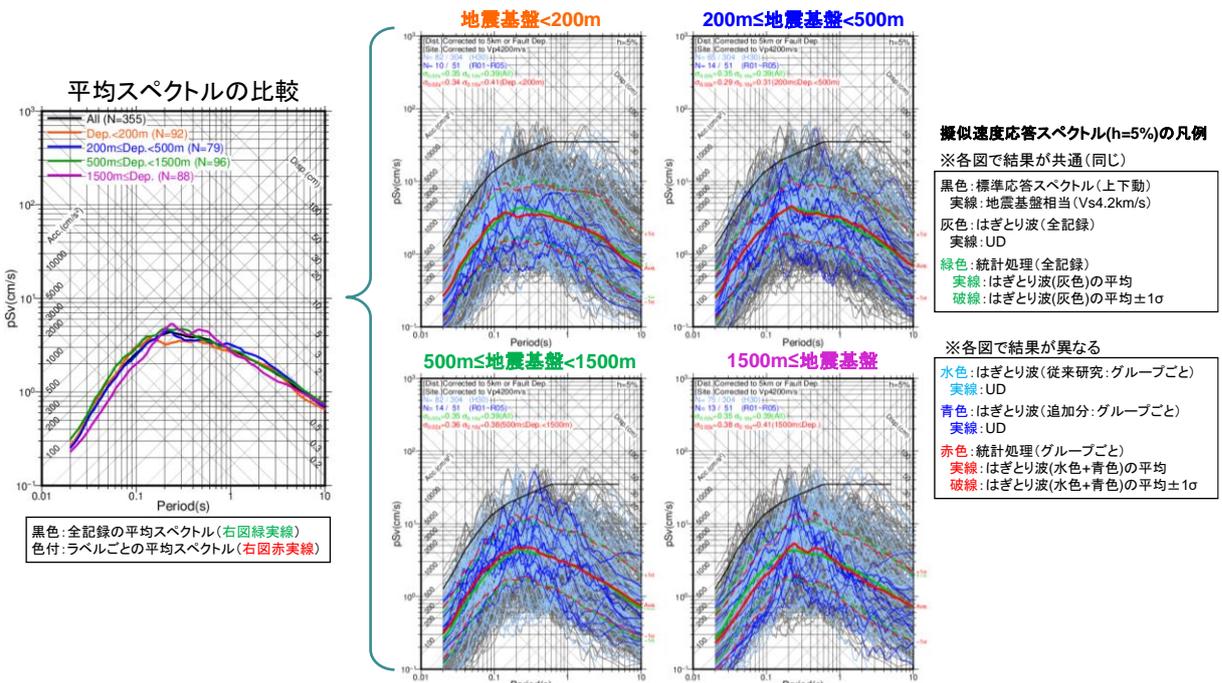
図 5.18 「⑧ 地中地震計位置の地盤の Vs」 のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.18 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑧ Vs at downhole seismometer position”

<水平動>



<上下動>

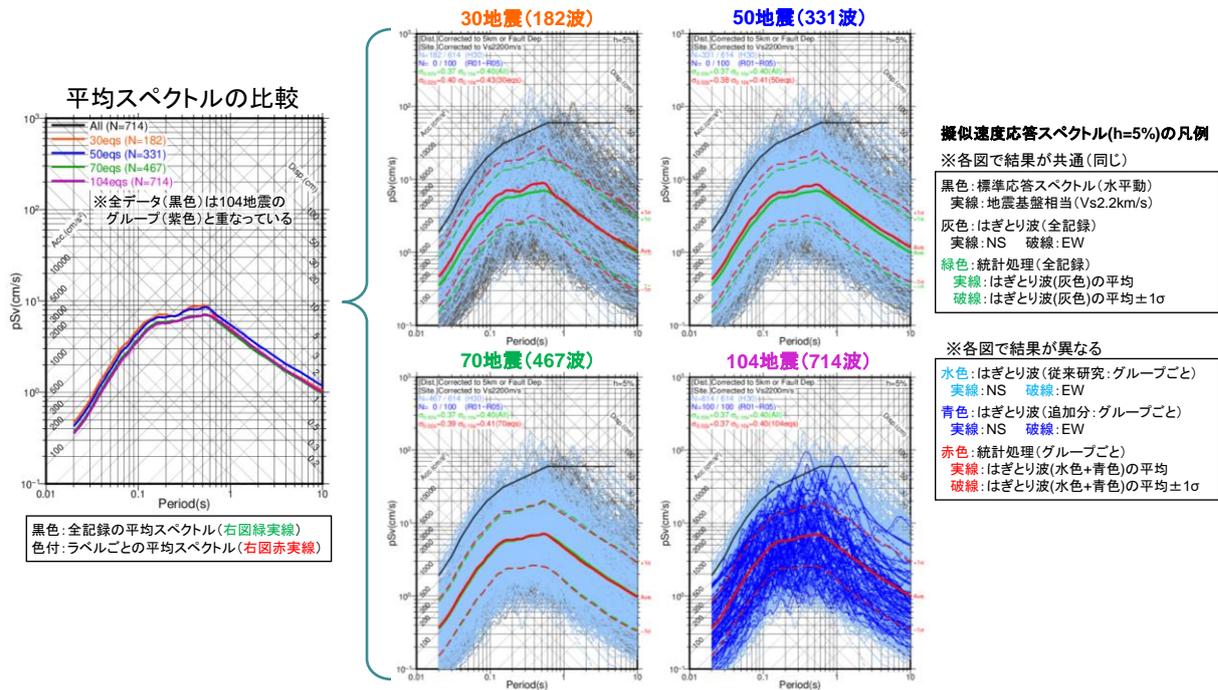


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

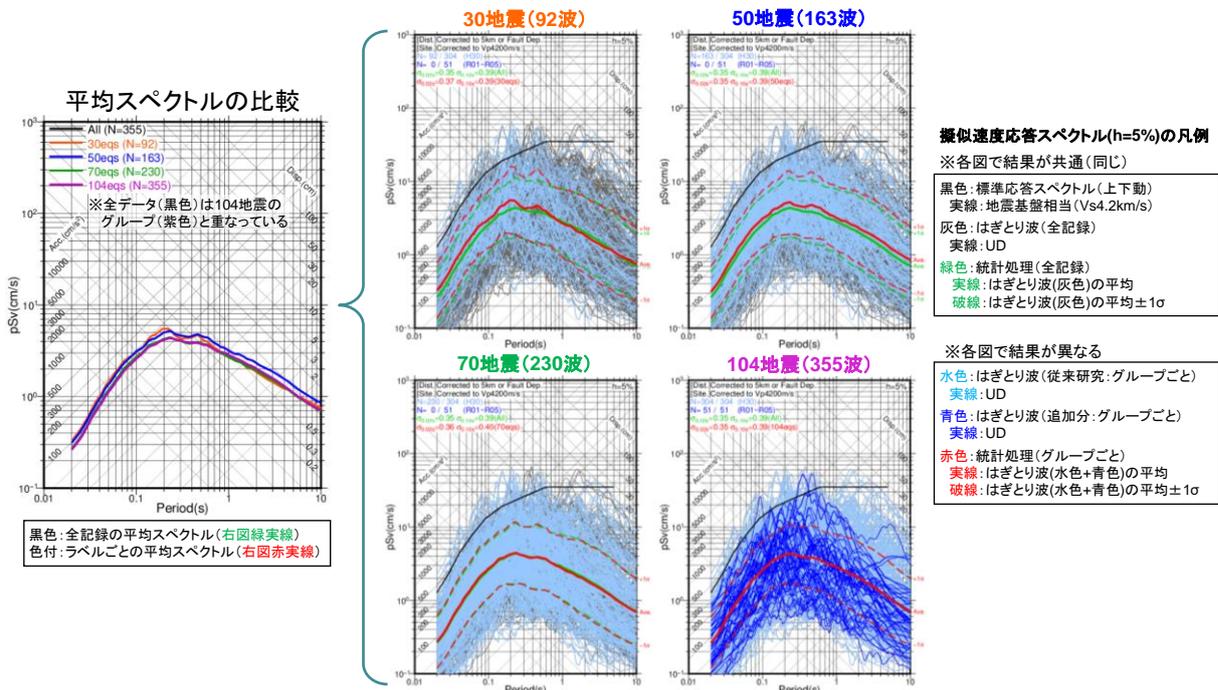
図 5.19 「⑨ 地中地震計位置での地震基盤深さ」のラベル付けに基づくグループごとの  
 応答スペクトルの比較

Figure 5.19 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑨ depth at the  
 downhole seismometer position”

<水平動>



<上下動>

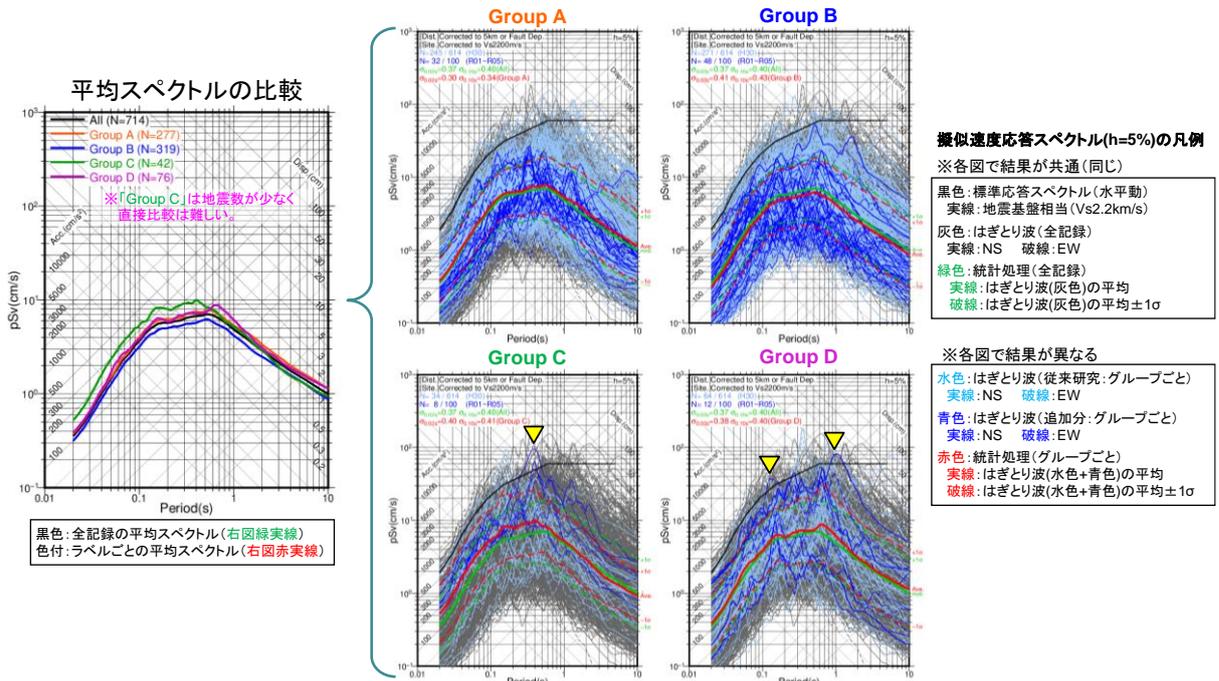


※ pSv : 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

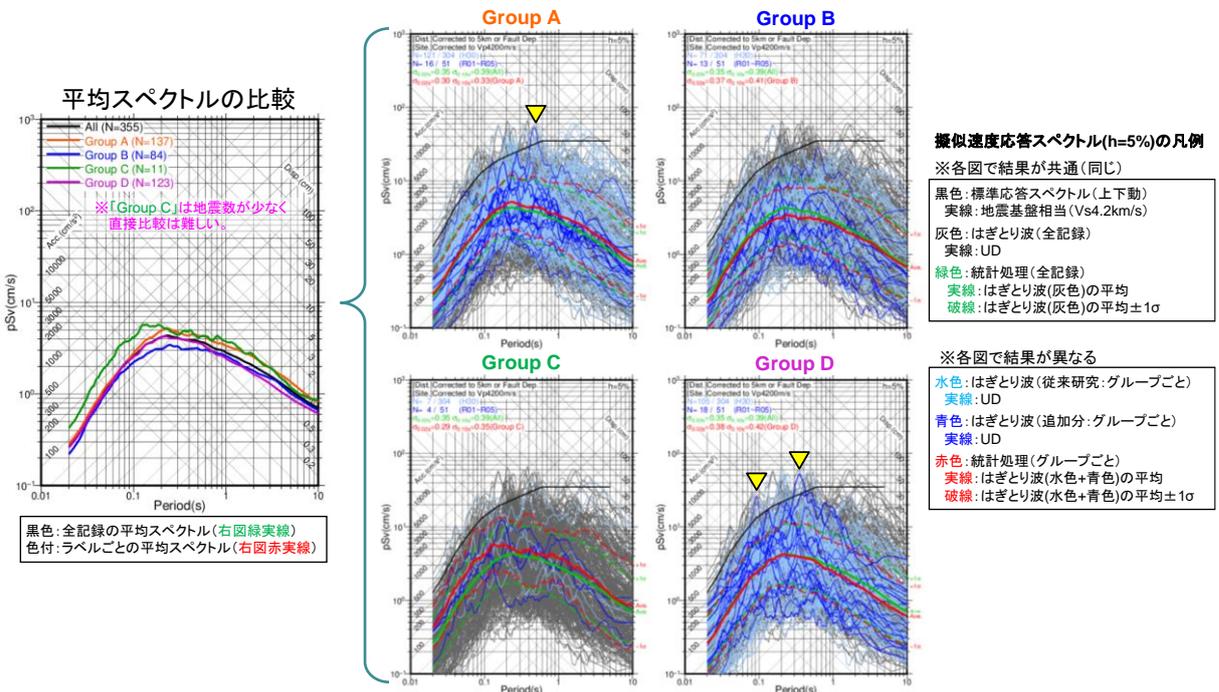
図 5.20 「⑩ 統計処理に用いる地震の数」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.20 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑩ number of earthquakes used for statistical processing”

＜水平動＞



＜上下動＞



※ pSv: 擬似速度応答スペクトル (減衰定数 h=5%)

図 5.21 「⑪ 特徴的な地震動」のラベル付けに基づくグループごとの応答スペクトルの比較

Figure 5.21 Comparison of response spectra for each group based on labeling “⑪ characteristic ground-motion”

## 6. 統計処理による非超過確率別応答スペクトルの算出

はぎとり波の応答スペクトルからなるデータセットに対して、データの選定条件及び重み付けのパターンを変えた複数ケースを設定して統計処理を行い、50.0%（平均）、84.1%（平均+1 $\sigma$ ）、90.0%、95.0%、97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の非超過確率に対応する応答スペクトルを算出した。

### 6.1 算出ケース

5.1 のラベル付けによる分析結果を踏まえて、統計処理のデータセットを全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」の条件に近づけて不確実さを低減させることを目的に、従来研究と同様に、算出ケースとして以下の6ケース並びに参考及び確認用の5ケースの計11ケース（a・bを区別）を設定した。ケース一覧を表6.1に示す。

#### ケース1：全データ

収集・整理した Mw5.0～6.6 の104地震の全ての観測記録を対象とした。なお、補正による影響確認のために以下の参考ケースを設定した。

- ・ ケース1'a：震源距離・地盤物性の補正なし
- ・ ケース1'b：地盤物性補正のみ（震源距離補正なし）

#### ケース2：対象地震の規模（Mw6.5未満）

対象地震を全国共通に考慮すべき「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」に近いものにするために、地震のスケーリング則の観点から、Mw6.5以上で「震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」のうち「地域性を考慮する地震動（Mw6.5程度以上）」に当たる地震を除き、Mw6.5未満の地震を対象とした。

#### ケース3：規模別の地震・記録数（G-R則を想定）

ケース1の Mw5.0～6.6の地震規模別頻度には偏りや凹凸も見られるため（図6.1上段）、本ケースでは理想的にG-R則<sup>22</sup>に従うデータセット（図6.1下段）となるように、重み付けを施した。具体的には、図6.1に示すように、地震規模ごとにG-R則（b値=0.9）に従う地震数とその記録数を計算して「G-R則想定<sup>22</sup>の推定記録数/元々の観測記録数」を規模別の重みとして各データに乗じた。ここで、G-R則に従うと仮定した場合の推定記録数は、データセットにおいては1地震につき平均して約4記録ずつ得られていることから、水平動はG-R則想定<sup>22</sup>の地震数の8倍（4記録×2成分）、上下動はG-R則想定<sup>22</sup>の地震数の4倍（4記録×1成分）とした。

#### ケース 4：はぎとり精度（人工要因による特徴的な地震動の影響を低減）

はぎとり解析の精度が低いこと（人工要因）による「特徴的な地震動」がデータセットに含まれている影響を低減させるために、5.2の「⑩特徴的な地震動」のラベル付けによる確認結果に基づき、人工要因による特徴を含む Group C, D の地震動記録の重みを 0.5 又は 0 とした。

- ・ ケース 4a：C=0.5、D=0
- ・ ケース 4b：C=0、D=0

#### ケース 5：地中地震計位置の地盤の Vs（Vs=2000m/s 以上）

元々地震基盤相当面に近い地盤で観測された地震動記録のみに絞り、地盤物性補正の不確かさを低減させるために、地中地震計位置の地盤の Vs が 2000 m/s 以上の地震動記録のみを対象とした。ここで、地震基盤相当面の Vs は、補正に用いた地盤増幅率の経験式<sup>16</sup>における定義を参考に Vs 2200 m/s 以上としているが、5.2における「⑧地中地震計位置の地盤の Vs」のラベル付けによる確認において Vs を 1000 m/s ごとにグループ分けした関係で、ケース 5 の統計処理においては地中地震計位置の Vs が 2000 m/s 以上の場合を元々地震基盤相当面に近い地盤で観測された地震動記録として扱った。

なお、ケース 5 は、地盤に関しては理想的な条件であり、非超過確率 97.7% の応答スペクトルレベルは他のケースに比べて小さくなることを確認したが、データの充足度が低いことから、検討チームにおける標準応答スペクトルの策定には使用されていない。

#### はぎとり精度の確認用のケース

ケース 2'：ケース 2（Mw6.5 未満）について、ケース 4 と同様にはぎとり精度に係る人工要因による特徴的な地震動の影響を低減させるために、5.2の「⑩特徴的な地震動」のラベル付けによる人工要因による特徴を含む Group C, D の地震動記録の重みを 0.5 又は 0 とした。

- ・ ケース 2'a：C=0.5、D=0
- ・ ケース 2'b：C=0、D=0

ケース 4'：周期 0.5 秒程度以下でのはぎとり精度を確認するために、全データに対して、はぎとり解析を行わずに地中観測記録の振幅を 2 倍にした。

表 6.1 非超過確率別応答スペクトルの算出ケース

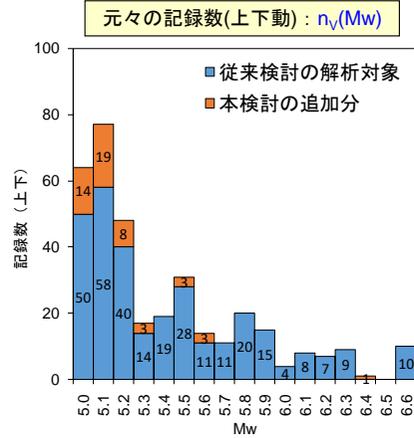
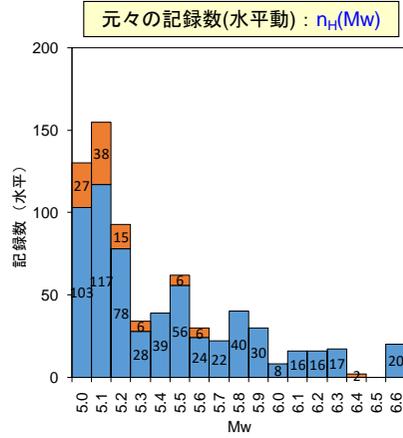
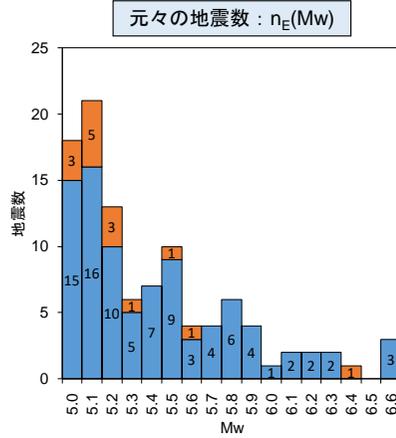
Table 6.1 Calculation cases of the response spectra corresponding to non-exceedance probabilities

ケース	補正 (震源距離補正、 地盤物性補正)	データの選定・重み付け	標準応答スペクトル 策定での採用状況 (○採用、×不採用)	
全データ	ケース 1	あり	なし	×
	ケース 1'a(参考)	なし	なし	×
	ケース 1'b(参考)	地盤物性補正のみ	なし	×
対象地震の規模 (Mw6.5 未満)	ケース 2	あり	Mw6.5 未満の地震記録のみ選定 (Mw6.6 の地震除外)	○
規模別の地震・記録数 (G-R 則想定)	ケース 3	あり	G-R 則を想定した重み付け	○
はざとり精度 (人工要因による特徴的な地震動※の 影響を低減)	ケース 4a	あり	特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの 重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0)	○
	ケース 4b	あり	特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの 重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0)	○
地中地震計位置の地盤条件 (Vs2000m/s 以上)	ケース 5	あり	Vs 2000 m/s 以上の地震基盤相当面に近い地盤で観測された 地震動のみ選定	×
はざとり精度の確認用	ケース 2'a (確認用)	あり	Mw6.5 未満の地震記録のみ (Mw6.6 の地震除外)かつ 特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの 重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0)	○
	ケース 2'b (確認用)	あり	Mw6.5 未満の地震記録のみ (Mw6.6 の地震除外)かつ 特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの 重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0)	○
	ケース 4' (確認用)	あり	はざとり解析を行わずに地中観測記録を 2 倍した場合 (データの選定・重み付けなし)	○

※はざとり解析の精度が低いこと (人工要因) により生じたと考えられる特異なピーク等の特徴を持つ地震動。

元々の対象地震・記録数

Mw	地震数	水平動 記録数 (NS,EW成分)	上下動 記録数 (UD成分)
5.0	18	130	64
5.1	21	155	77
5.2	13	93	48
5.3	6	34	17
5.4	7	39	19
5.5	10	62	31
5.6	4	30	14
5.7	4	22	11
5.8	6	40	20
5.9	4	30	15
6.0	1	8	4
6.1	2	16	8
6.2	2	16	7
6.3	2	17	9
6.4	1	2	1
6.5	0	0	0
6.6	3	20	10
合計	104	714	355

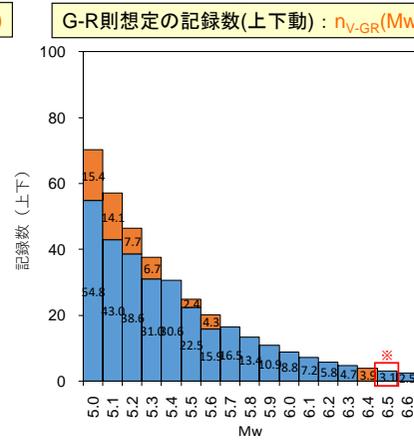
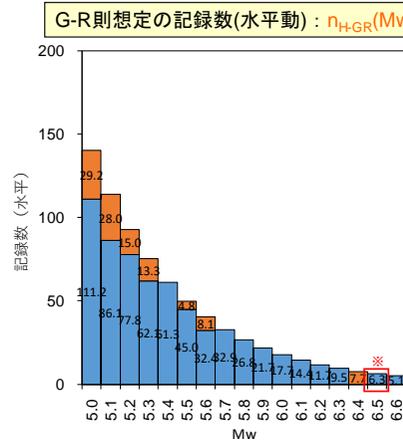
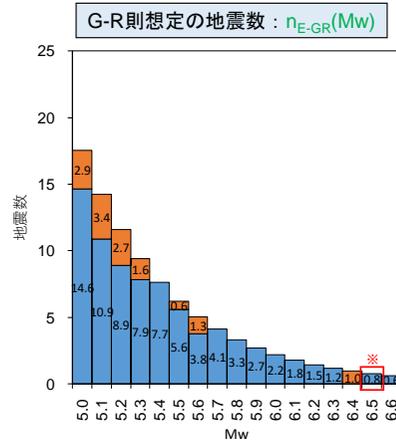


記録数:  $n_{HGR}(Mw) = n_{E-GR}(Mw) \times 8^*$   
 重み:  $w_H(Mw) = n_{HGR}(Mw) / n_H(Mw)$   
\*どの地震でも1地震につき4記録×2成分収集したと仮定。

記録数:  $n_{VGR}(Mw) = n_{E-GR}(Mw) \times 4^*$   
 重み:  $w_V(Mw) = n_{VGR}(Mw) / n_V(Mw)$   
\*どの地震でも1地震につき4記録×1成分収集したと仮定。

G-R則を想定した場合 (b値=0.9を仮定)

Mw	地震数	水平動 記録数 (地震数×8)	上下動 記録数 (地震数×4)
5.0	17.5	140.4	70.2
5.1	14.3	114.1	57.1
5.2	11.6	92.8	46.4
5.3	9.4	75.4	37.7
5.4	7.7	61.3	30.6
5.5	6.2	49.8	24.9
5.6	5.1	40.5	20.2
5.7	4.1	32.9	16.5
5.8	3.3	26.8	13.4
5.9	2.7	21.7	10.9
6.0	2.2	17.7	8.8
6.1	1.8	14.4	7.2
6.2	1.5	11.7	5.8
6.3	1.2	9.5	4.7
6.4	1.0	7.7	3.9
6.5	0.8	6.3	3.1
6.6	0.6	5.1	2.5
合計	91.0	728.0	364.0



※地震数(記録数)が0となるMw6.5の地震については、G-R則に従った数の距離減衰式<sup>13)</sup>による応答スペクトルの推定値(平均+1σ)のデータを追加した。一方、日本の内陸地殻内地震では震源断層が地表に突き抜ける影響でMw6.5付近でマグニチュードの不連続がありその付近の地震が少ないという知見もあるため、Mw6.5の地震が無いことは偶然でない可能性があるが、保守性を考えてMw6.5の地震を加えることとした。

図 6.1 G-R 則に従うことを想定した場合の地震・記録の規模別頻度分布 (ケース 3)

Figure 6.1 Magnitude-frequency distributions of earthquakes and records assuming the following of the G-R law (Case 3)

## 6.2 算出結果

6.1 で設定したケースについて、統計処理を行い、非超過確率別応答スペクトルを算出した。具体的には、図 6.2 に示すように、対象記録（はぎとり波）の擬似速度応答スペクトル (pSv) からなるデータセットについて、各周期の応答値から求めた幾何平均 ( $\mu$ ) と標準偏差 ( $\sigma$ ) を用いて、統計モデルとして対数正規分布を仮定して確率密度分布を求め、50.0% (平均)、84.1% (平均+1 $\sigma$ )、90%、95%、97.7% (平均+2 $\sigma$ ) の 5 種類の非超過確率における応答値を推定し、それらの値を非超過確率別に全周期帯で繋いで応答スペクトルを算出した。

図 6.3～図 6.24 に、各ケースの非超過確率別応答スペクトルの算出結果 (赤線) 及び地震規模別のデータ数、並びに代表的な周期における地震動強さの確率密度関数と実際のデータ分布の比較を示す。ケース 1 を除いて、非超過確率別応答スペクトルの結果図には、比較のためにケース 1 の結果 (緑線) も示す。

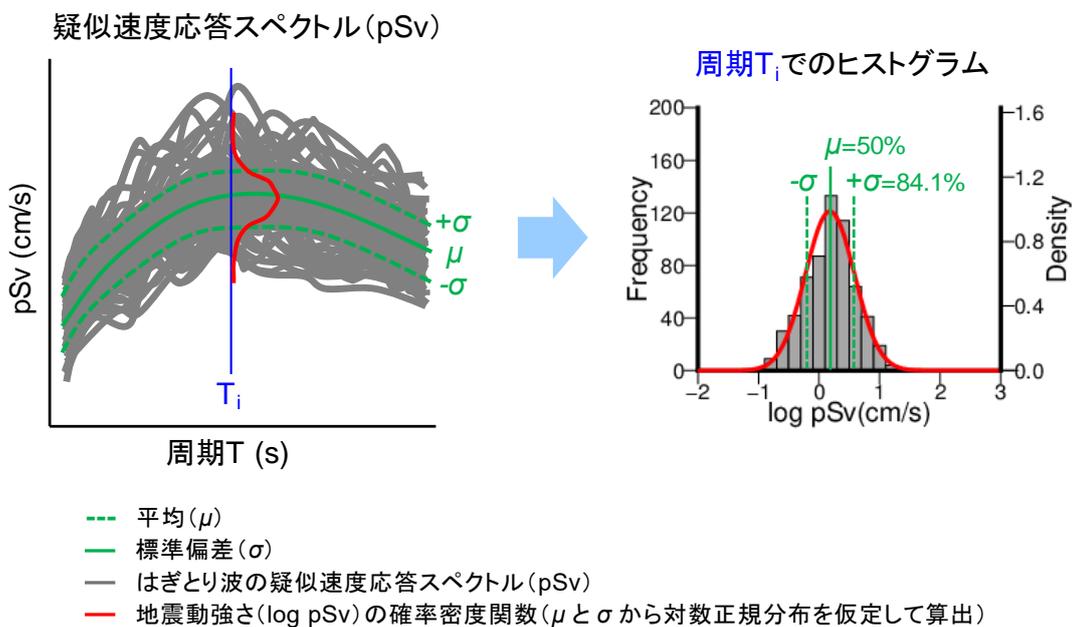


図 6.2 擬似速度応答スペクトルからなるデータセット (左) に基づく周期  $T_i$  における地震動強さ (擬似速度応答) の確率密度関数 (右) 算出の概念図

Figure 6.2 Conceptual diagram of calculating probability density function of ground-motion strength (pseudo-velocity response) at period  $T_i$  based on dataset consisting of pseudo-velocity response spectra

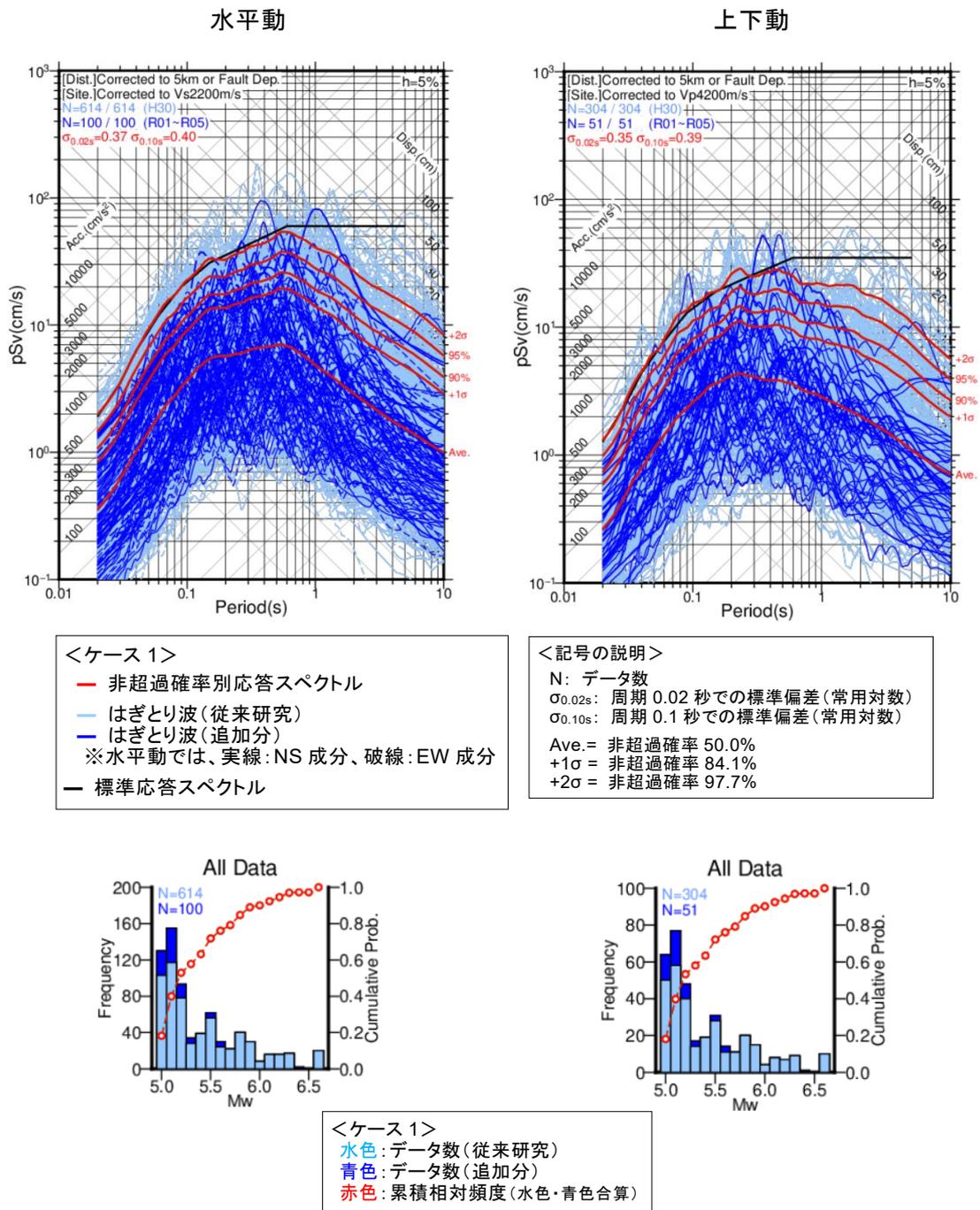
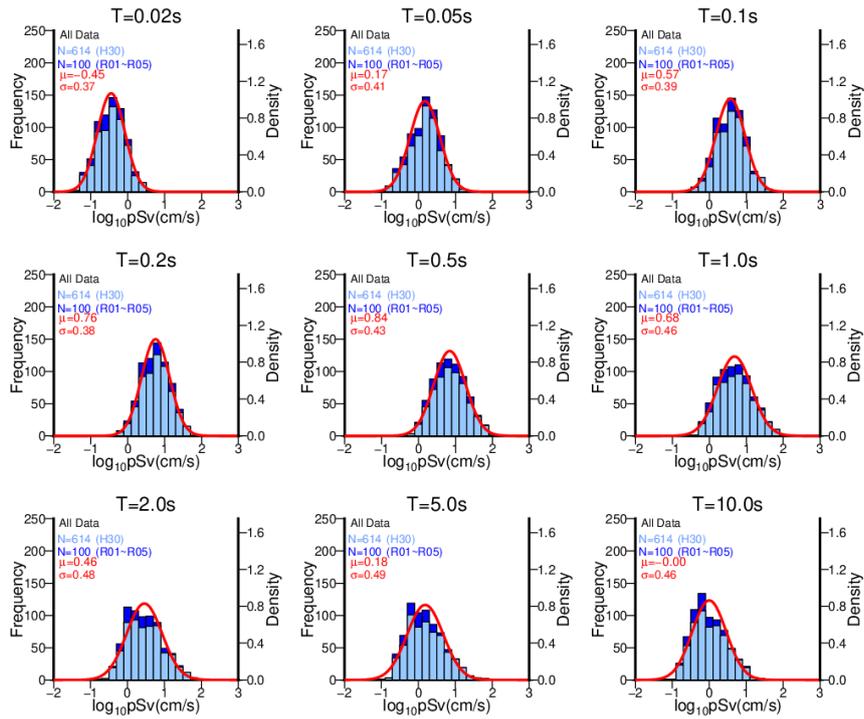


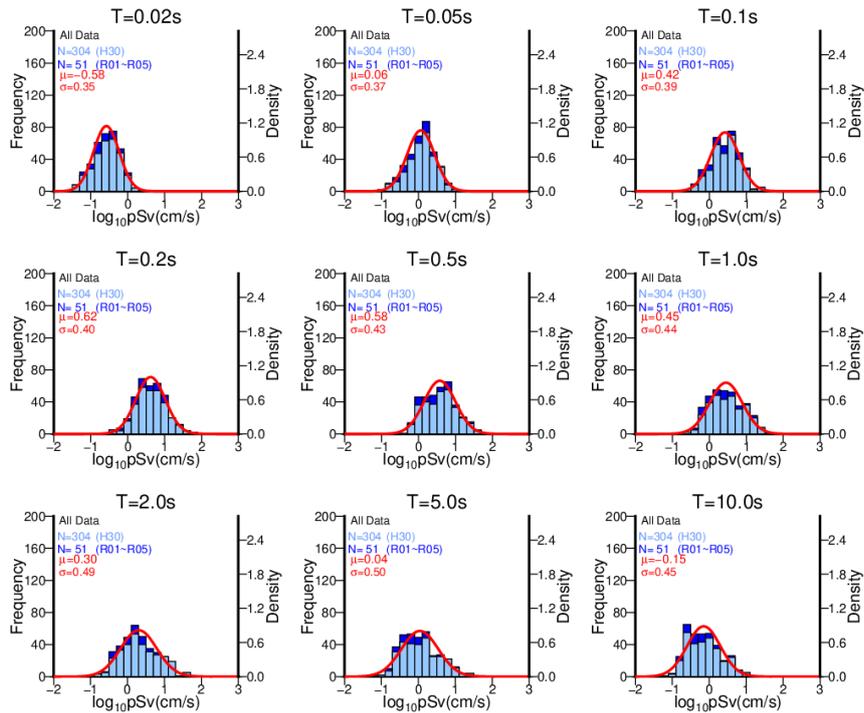
図 6.3 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 1 (全データ、補正あり)

Figure 6.3 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 1 (all data with adjustment)

<水平動>



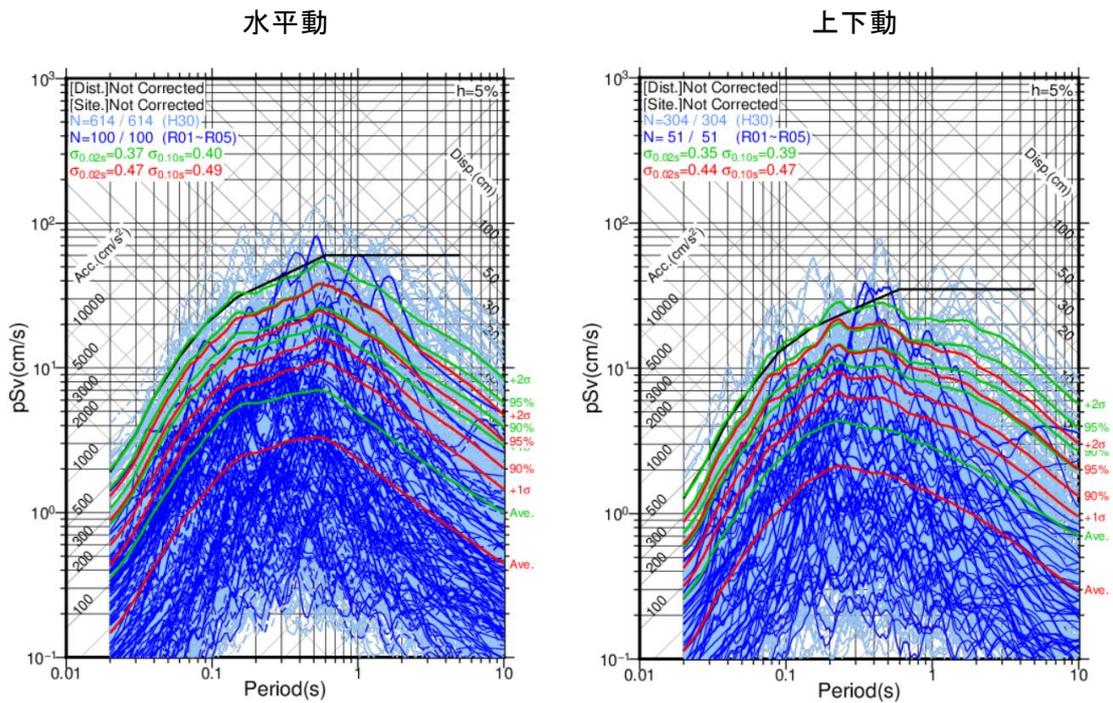
<上下動>



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

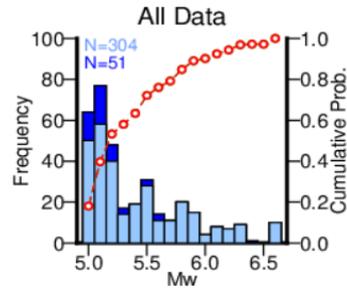
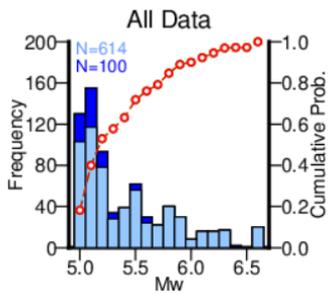
図 6.4 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 1

Figure 6.4 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 1



<ケース 1'a>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波 (従来研究)  
 — はぎとり波 (追加分)  
 ※水平動では、実線: NS 成分、破線: EW 成分  
 <ケース 1 (参考)>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — 標準応答スペクトル

<記号の説明>  
 N: データ数  
 $\sigma_{0.02s}$ : 周期 0.02 秒での標準偏差 (常用対数)  
 $\sigma_{0.10s}$ : 周期 0.1 秒での標準偏差 (常用対数)  
 Ave. = 非超過確率 50.0%  
 +1 $\sigma$  = 非超過確率 84.1%  
 +2 $\sigma$  = 非超過確率 97.7%

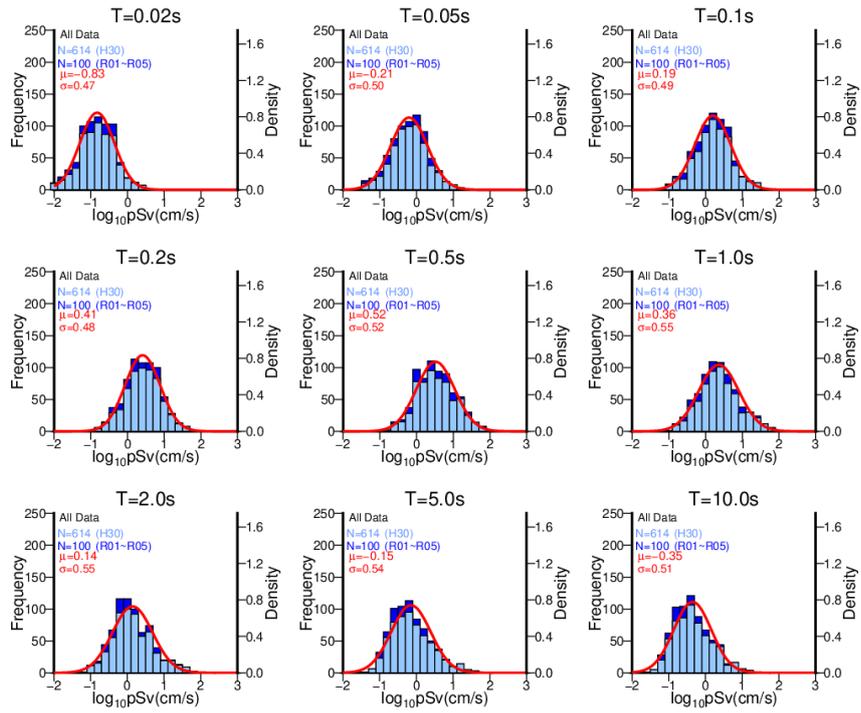


<ケース 1'a>  
 水色: データ数 (従来研究)  
 青色: データ数 (追加分)  
 赤色: 累積相対頻度 (水色・青色合算)

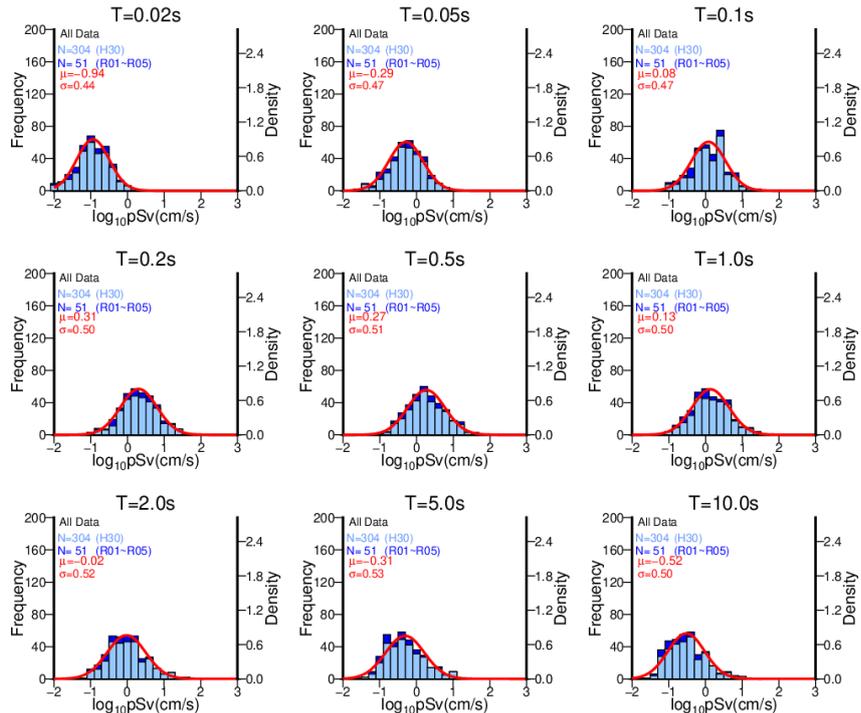
図 6.5 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 1'a (全データ、補正なし)

Figure 6.5 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 1'a (all data without adjustment)

<水平動>



<上下動>



水色: 従来研究のデータ、青色: 追加したデータ  
 赤色: 全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.6 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較: ケース 1'a

Figure 6.6 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 1'a

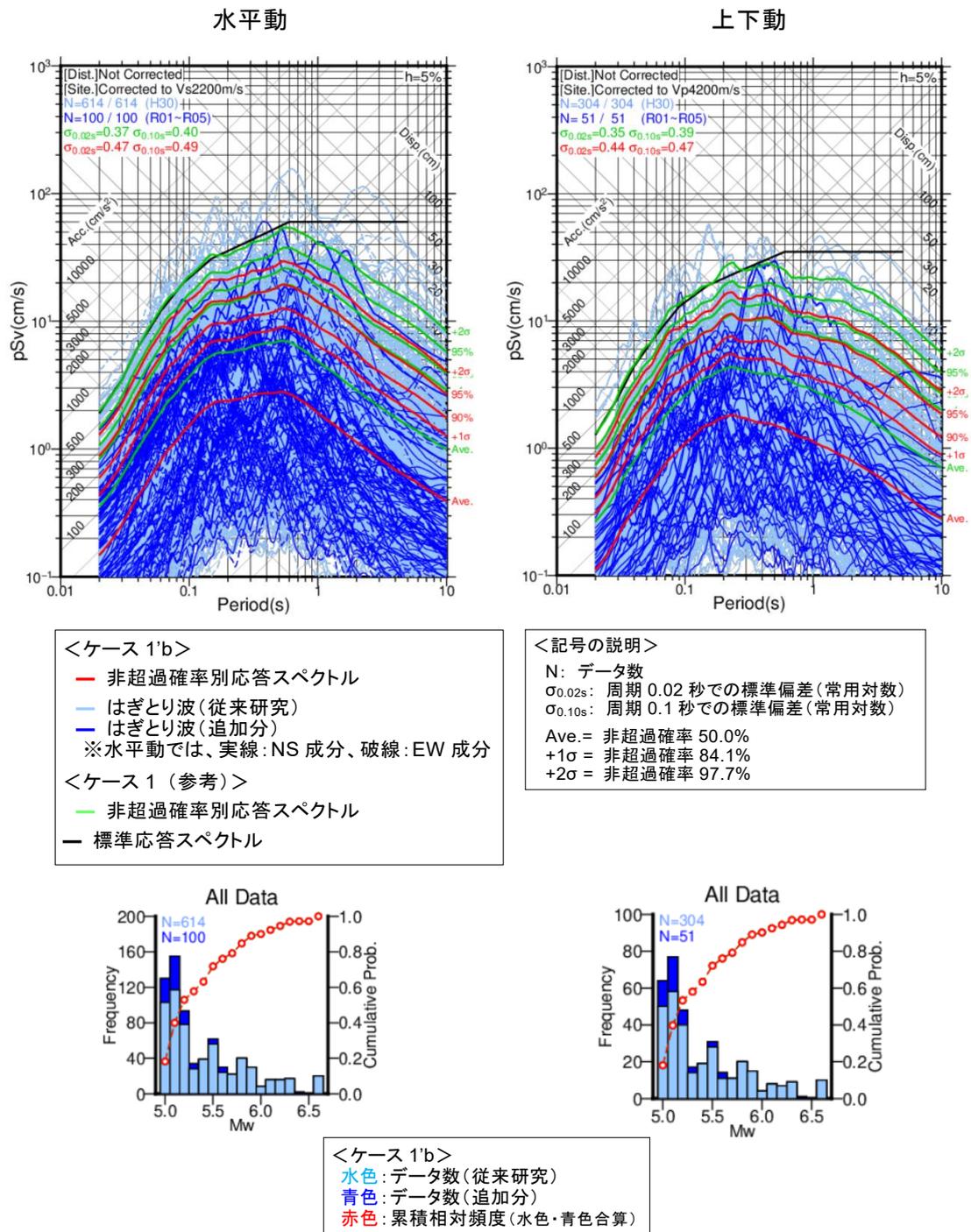
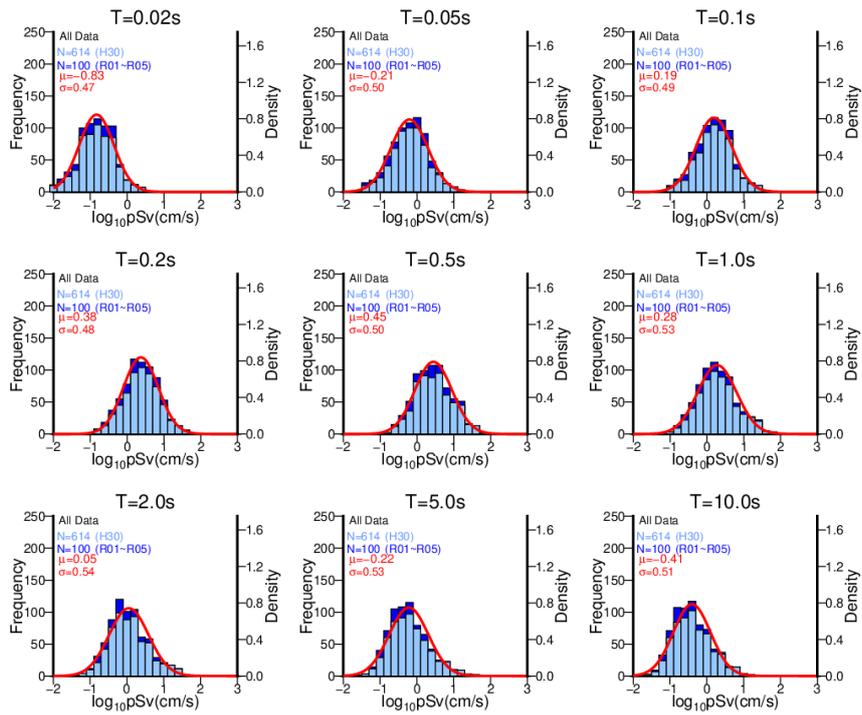


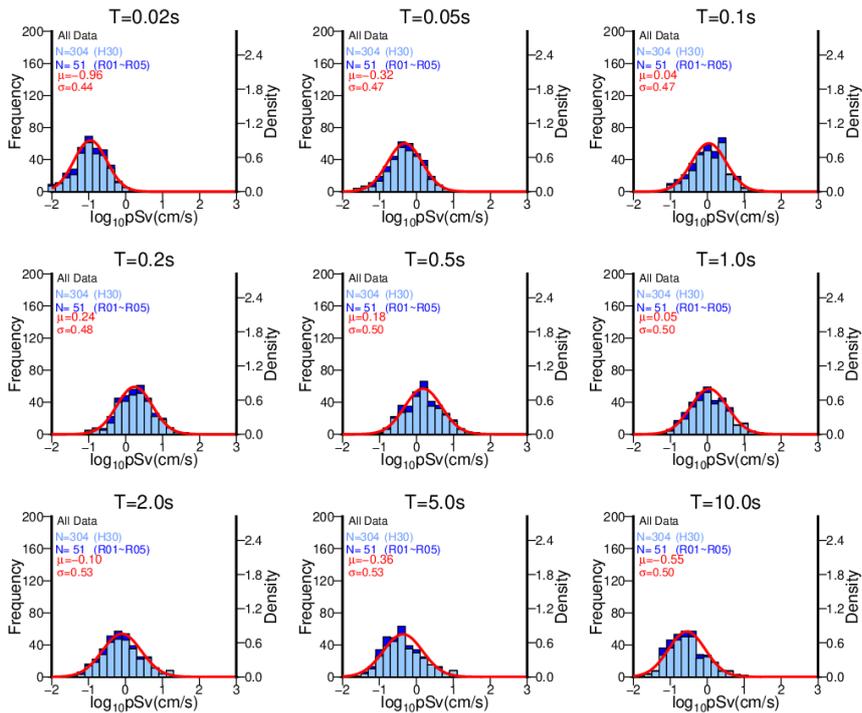
図 6.7 非超過確率別応答スペクトル（上段）及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度（下段）：ケース 1'b（全データ、地盤物性補正のみ）

Figure 6.7 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 1'b (all data adjusted only for the ground property)

<水平動>



<上下動>



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.8 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 1'b

Figure 6.8 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 1'b

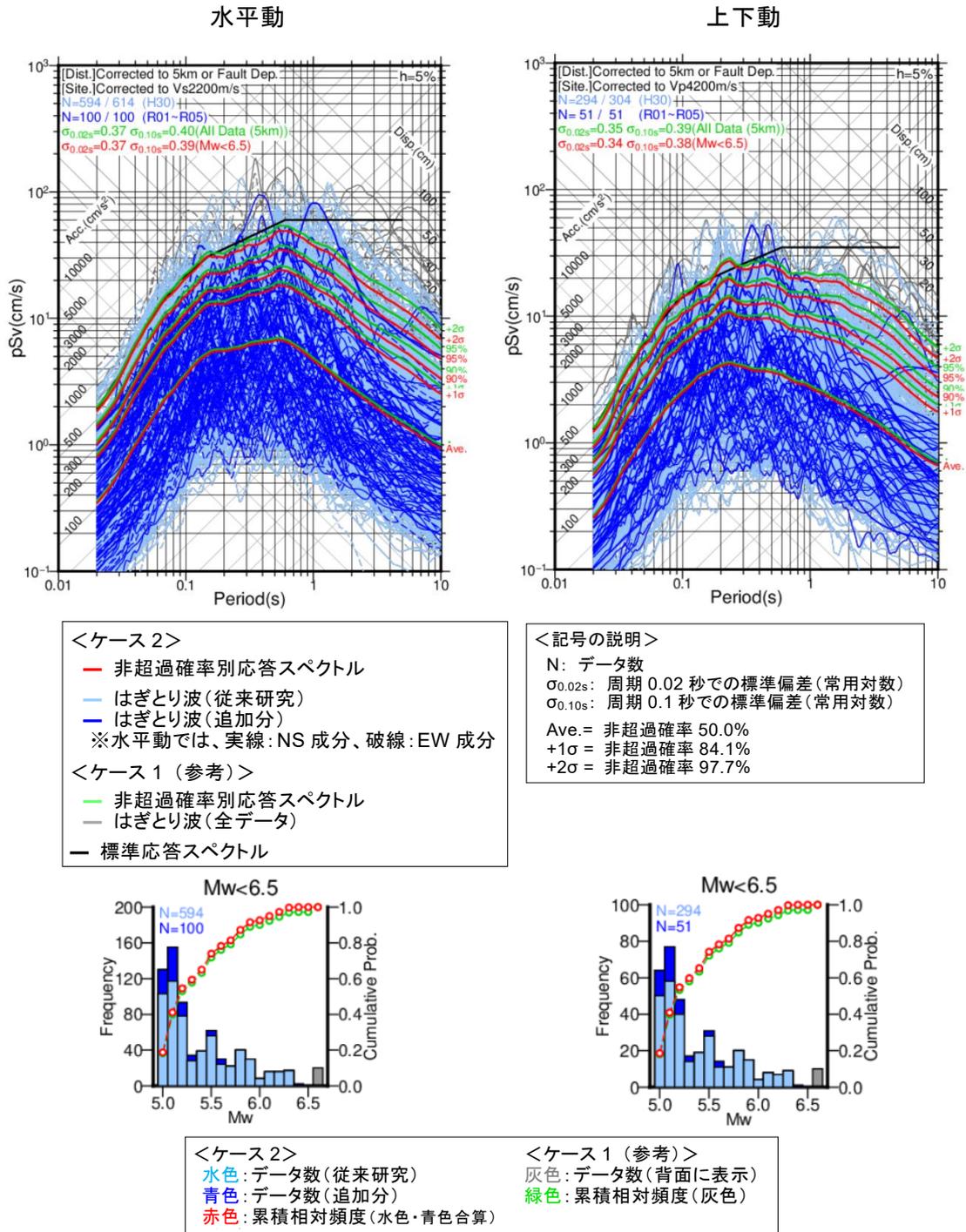
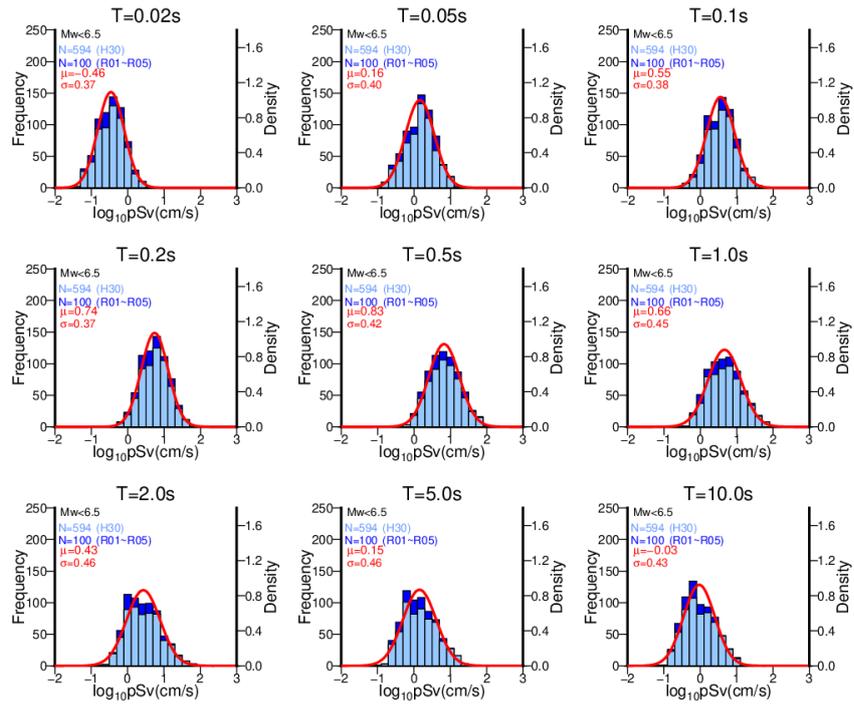


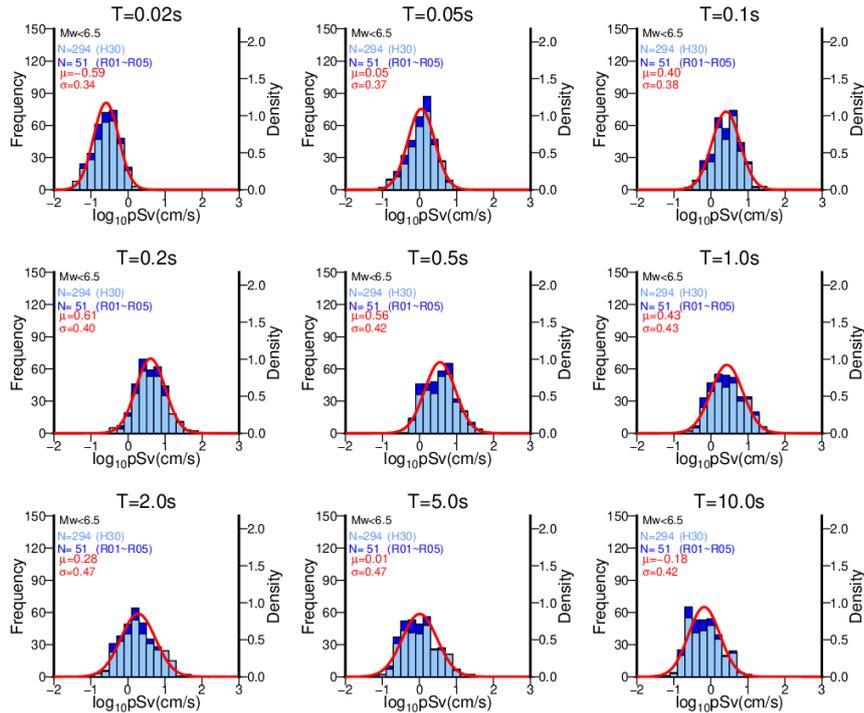
図 6.9 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 2 (Mw6.5 未満)

Figure 6.9 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 2 (Mw < 6.5)

< 水平動 >



< 上下動 >



水色 : 従来研究のデータ、青色 : 追加したデータ  
 赤色 : 全データ (灰色・青色) の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.10 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較 : ケース 2

Figure 6.10 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 2

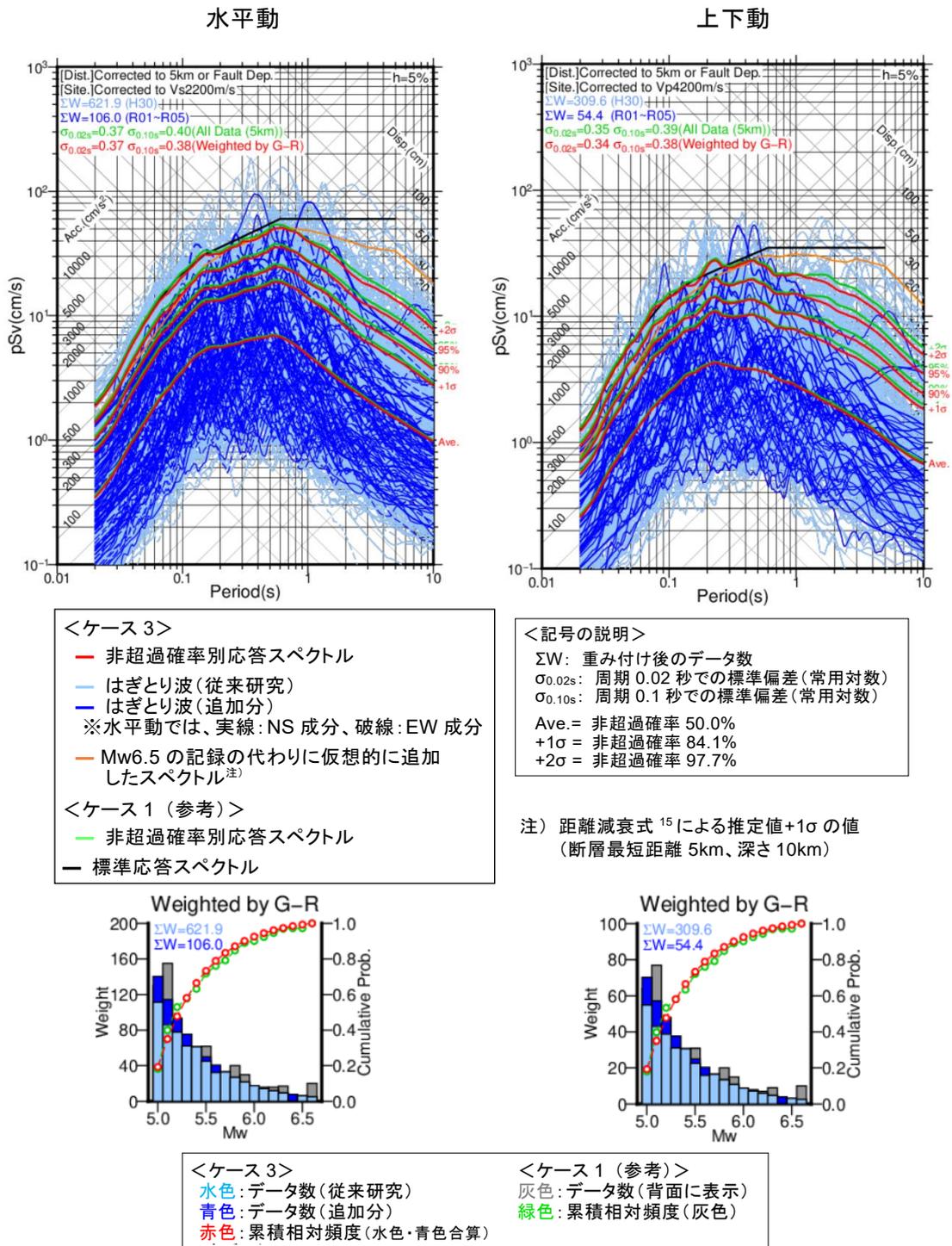
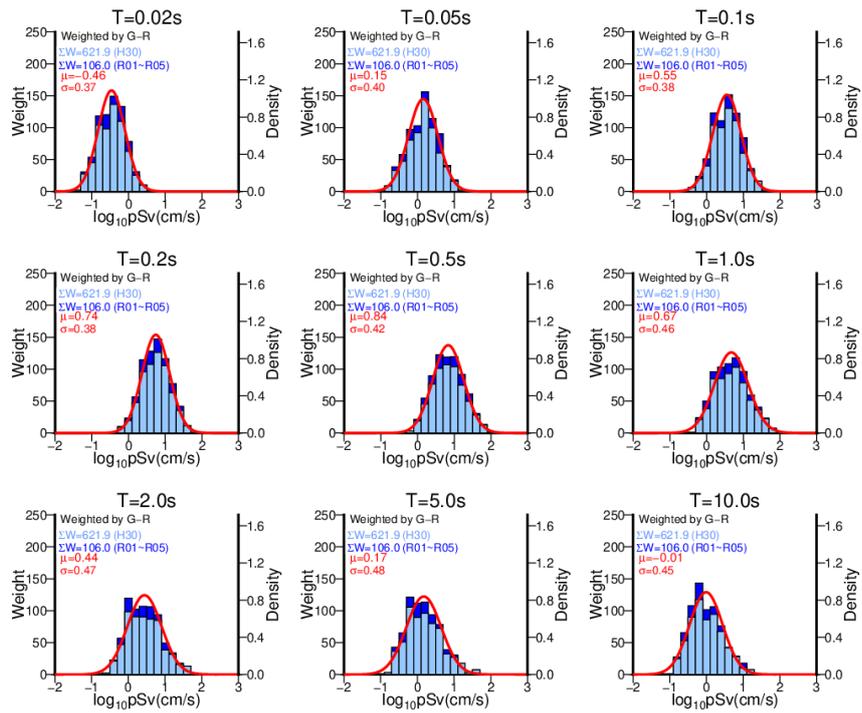


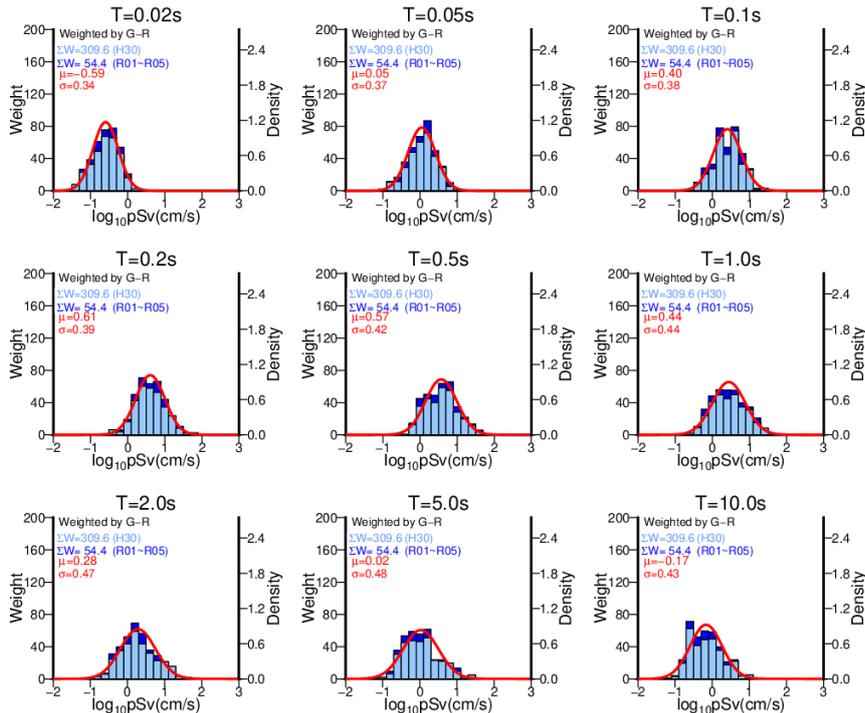
図 6.11 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 3 (G-R 則想定)の重み付け

Figure 6.11 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 3 (weighting following the G-R law)

<水平動>



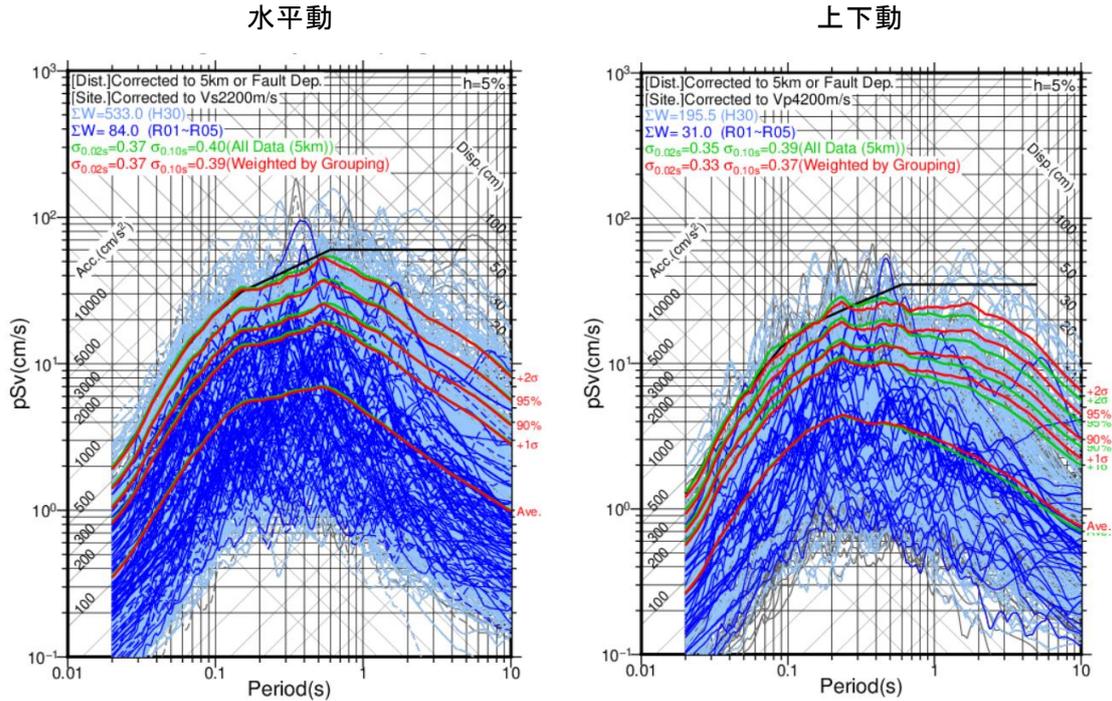
<上下動>



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.12 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 3

Figure 6.12 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 3

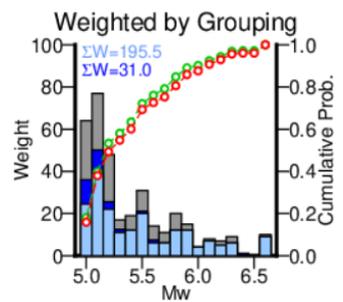
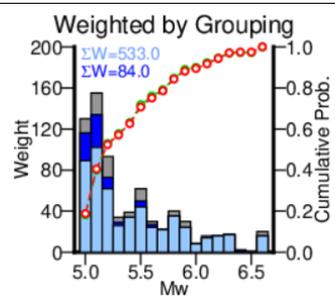


<ケース 4a>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波 (従来研究)  
 — はぎとり波 (追加分)  
 ※水平動では、実線: NS 成分、破線: EW 成分

<ケース 1 (参考)>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波 (全データ)  
 — 標準応答スペクトル

<記号の説明>  
 ΣW: 重み付け後のデータ数  
 σ<sub>0.02s</sub>: 周期 0.02 秒での標準偏差 (常用対数)  
 σ<sub>0.10s</sub>: 周期 0.1 秒での標準偏差 (常用対数)

Ave. = 非超過確率 50.0%  
 +1σ = 非超過確率 84.1%  
 +2σ = 非超過確率 97.7%



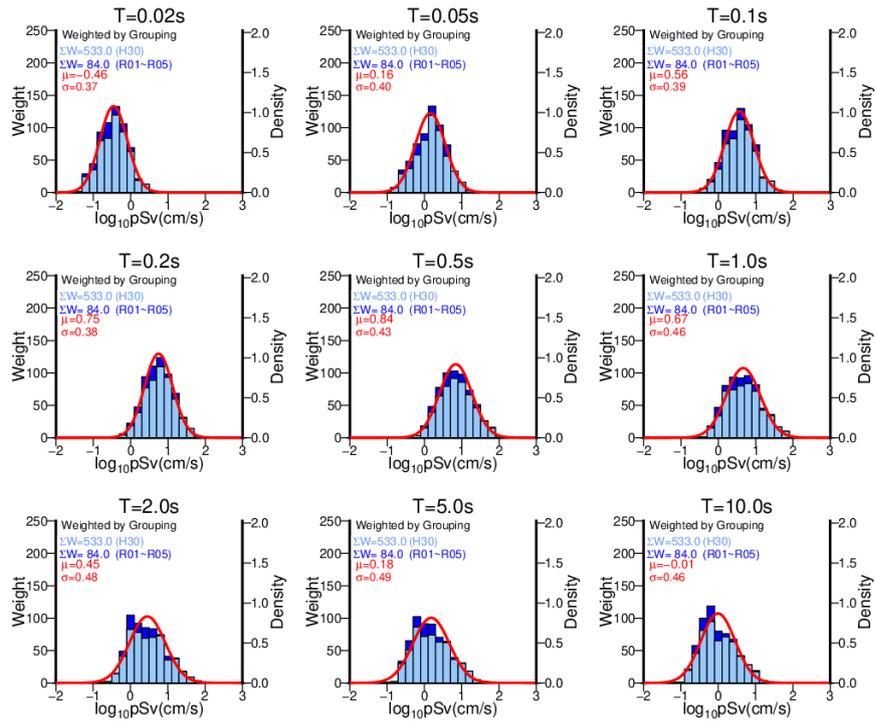
<ケース 4a>  
 水色: データ数 (従来研究)  
 青色: データ数 (追加分)  
 赤色: 累積相対頻度 (水色・青色合算)

<ケース 1 (参考)>  
 灰色: データ数 (背面に表示)  
 緑色: 累積相対頻度 (灰色)

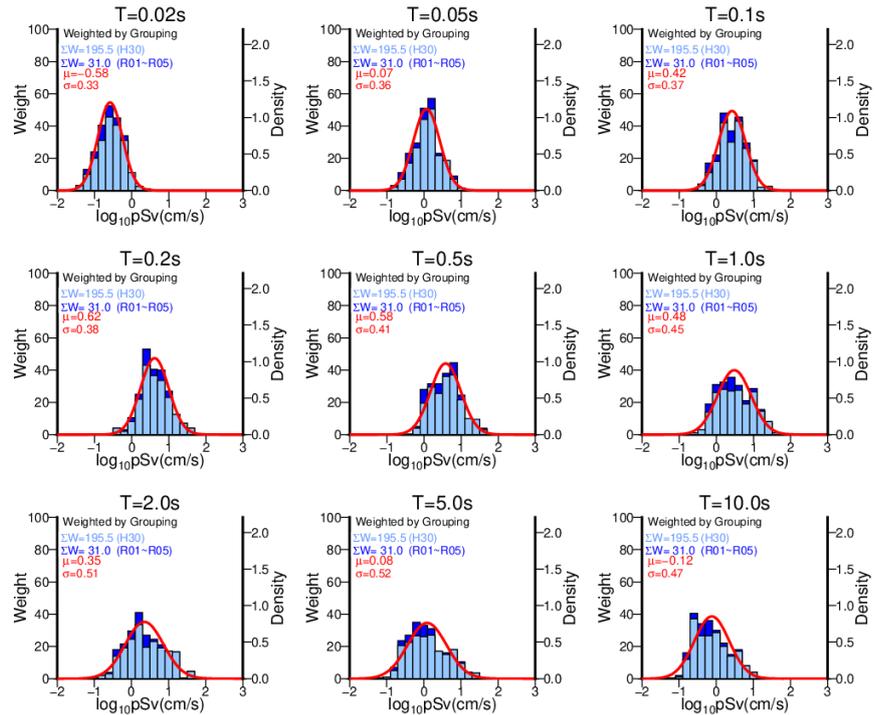
図 6.13 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 4a (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0) )

Figure 6.13 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 4a (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))

< 水平動 >



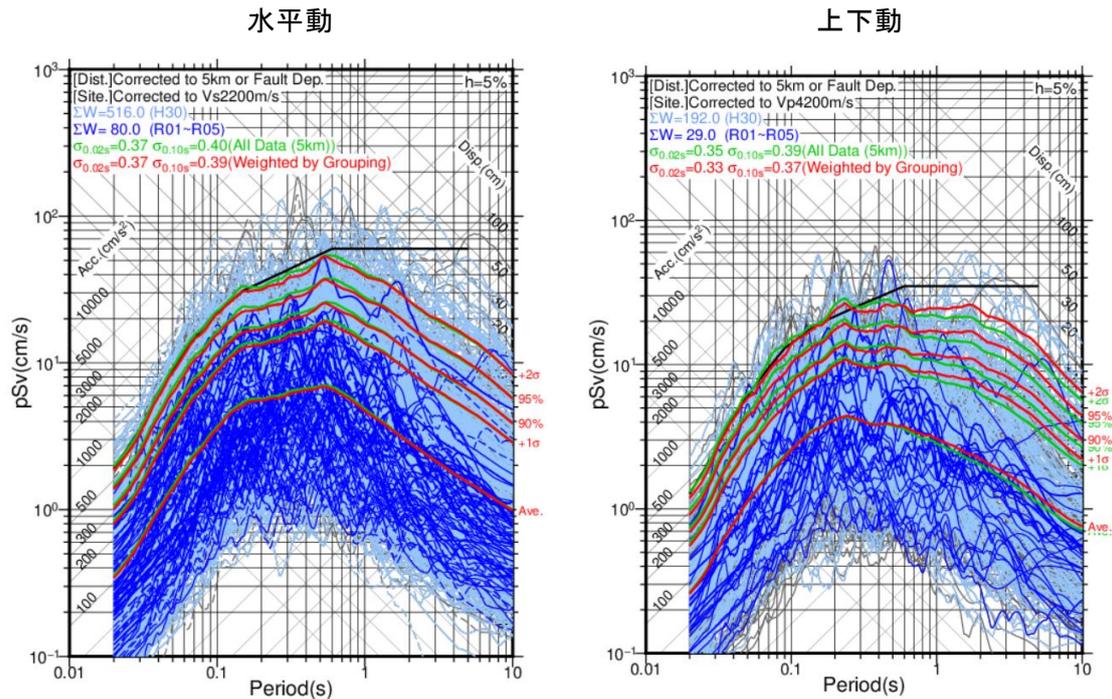
< 上下動 >



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.14 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 4a

Figure 6.14 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 4a

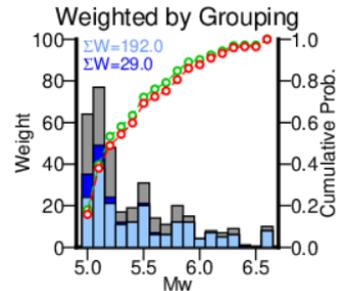
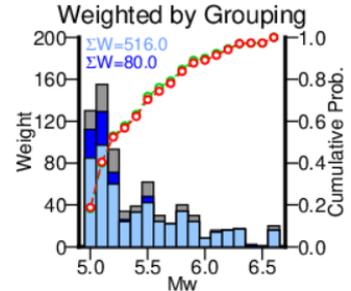


<ケース 4b>  
 - 非超過確率別応答スペクトル  
 - はぎとり波 (従来研究)  
 - はぎとり波 (追加分)  
 ※水平動では、実線: NS 成分、破線: EW 成分

<ケース 1 (参考)>  
 - 非超過確率別応答スペクトル  
 - はぎとり波 (全データ)  
 - 標準応答スペクトル

<記号の説明>  
 ΣW: 重み付け後のデータ数  
 σ<sub>0.02s</sub>: 周期 0.02 秒での標準偏差 (常用対数)  
 σ<sub>0.10s</sub>: 周期 0.1 秒での標準偏差 (常用対数)

Ave. = 非超過確率 50.0%  
 +1σ = 非超過確率 84.1%  
 +2σ = 非超過確率 97.7%



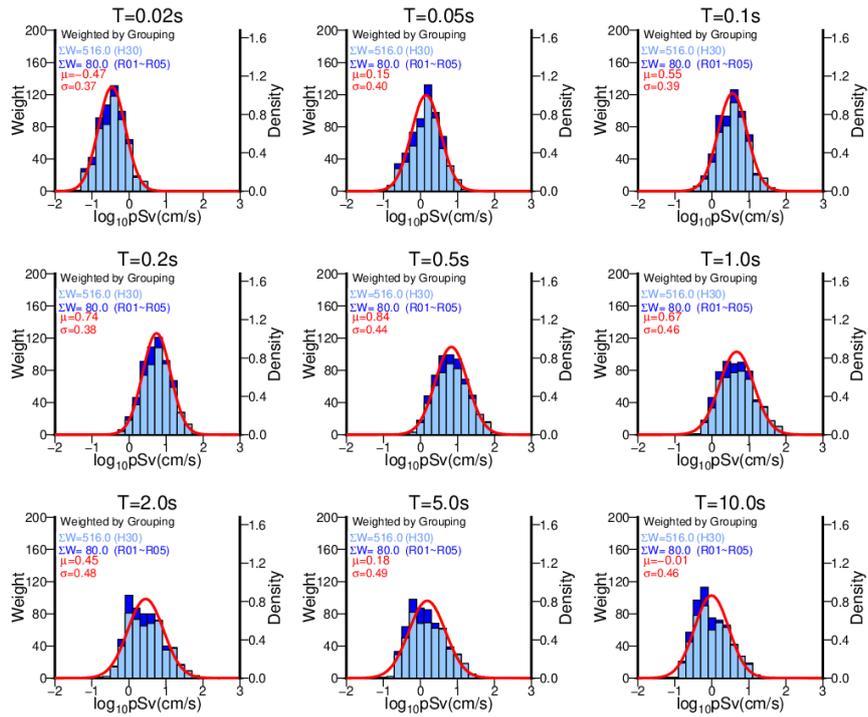
<ケース 4b>  
 水色: データ数 (従来研究)  
 青色: データ数 (追加分)  
 赤色: 累積相対頻度 (水色・青色合算)

<ケース 1 (参考)>  
 灰色: データ数 (背面に表示)  
 緑色: 累積相対頻度 (灰色)

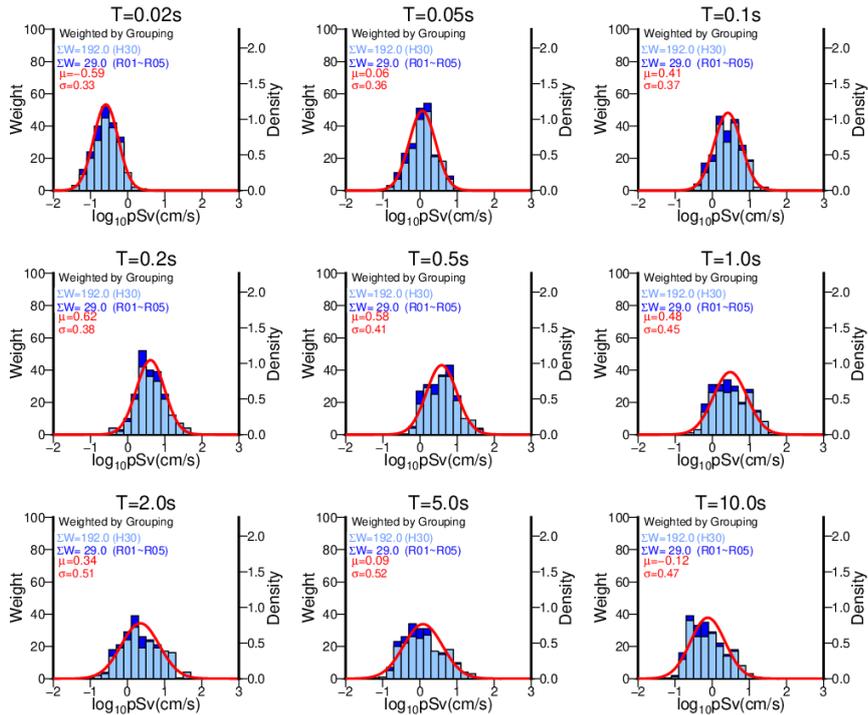
図 6.15 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 4b (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) )

Figure 6.15 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 4b (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))

< 水平動 >



< 上下動 >



水色 : 従来研究のデータ、青色 : 追加したデータ  
 赤色 : 全データ (灰色・青色) の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.16 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較 : ケース 4b

Figure 6.16 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 4b

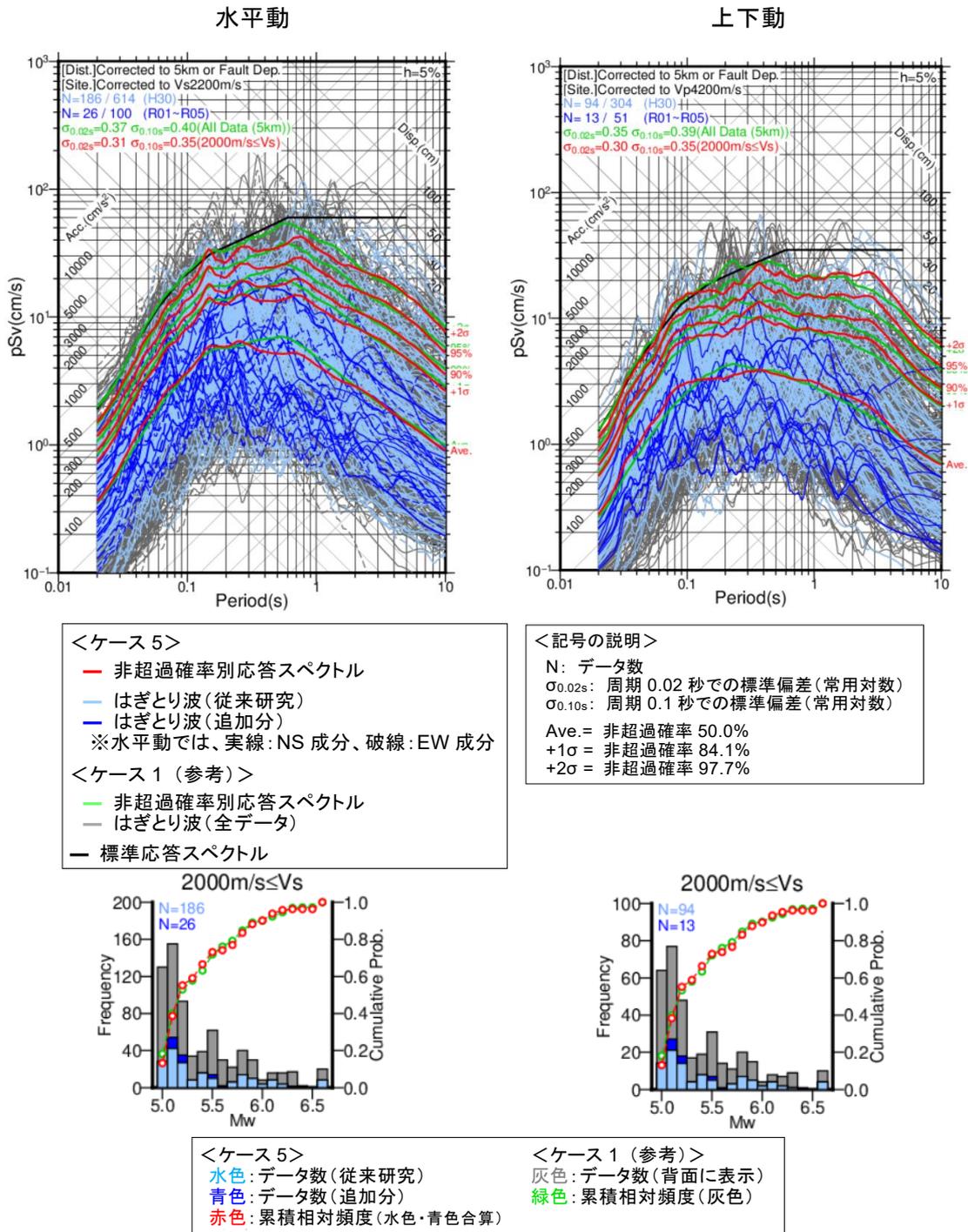
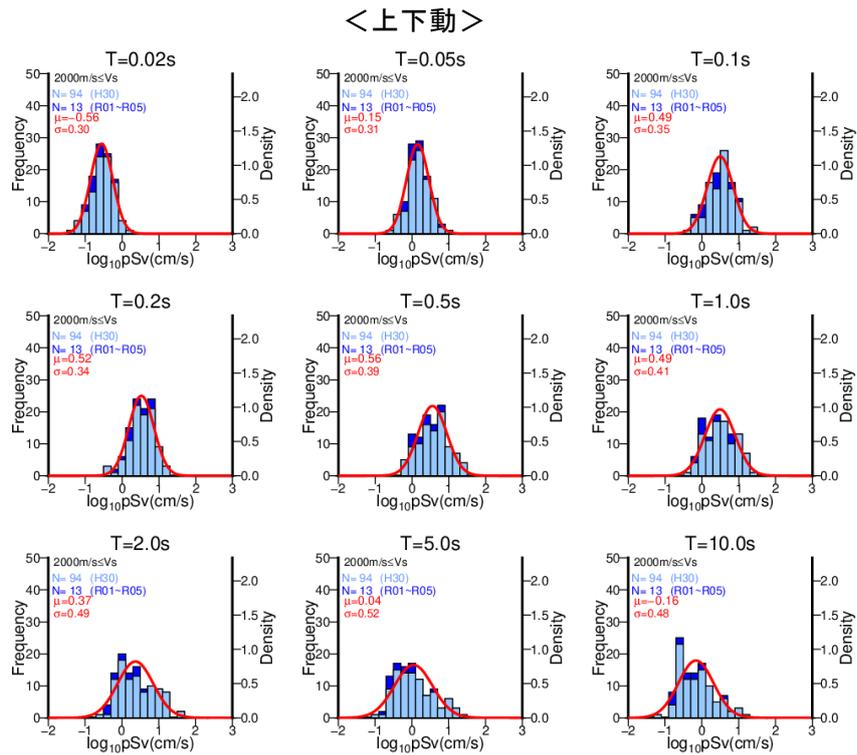
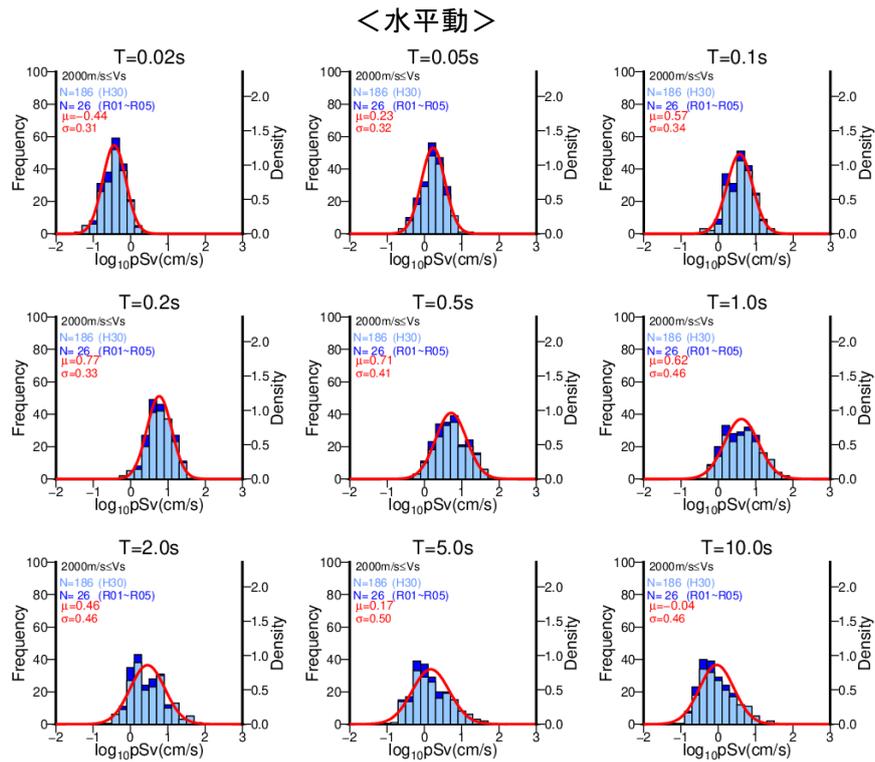


図 6.17 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 5 ( $V_s$  2000 m/s 以上の地盤におけるデータのみ)

Figure 6.17 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 5 (only data on the ground with  $V_s \geq 2000$  m/s)



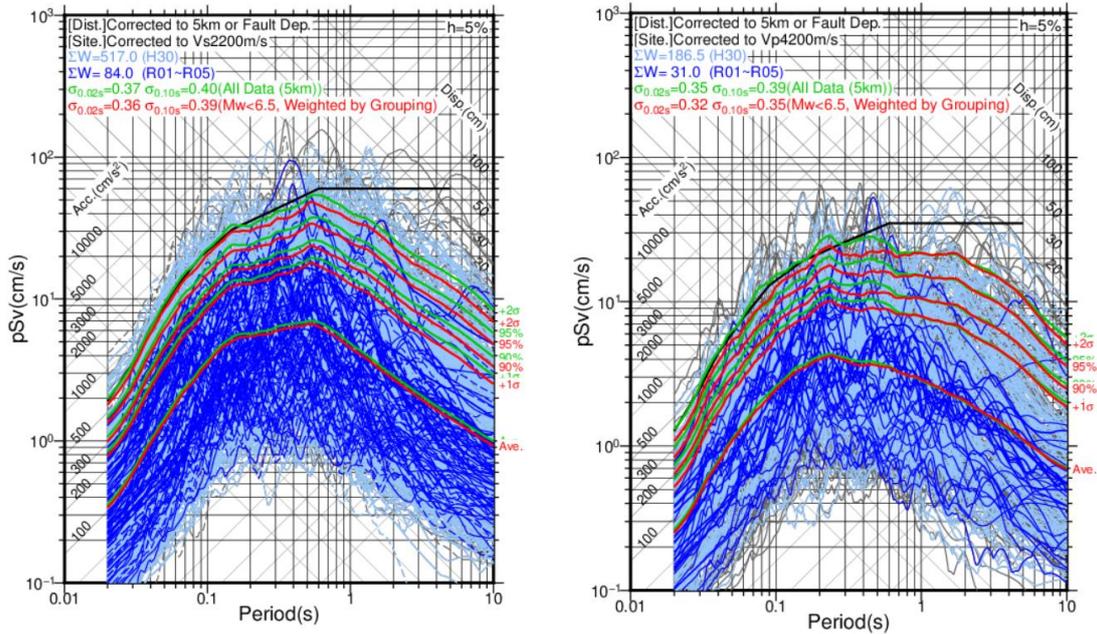
水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.18 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 5

Figure 6.18 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 5

水平動

上下動

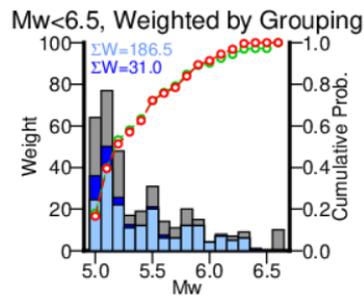
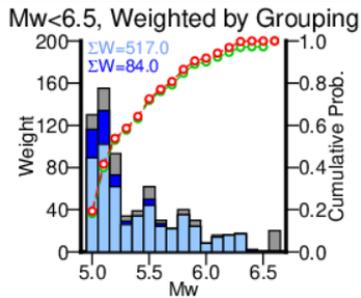


<ケース 2'a>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波 (従来研究)  
 — はぎとり波 (追加分)  
 ※水平動では、実線: NS 成分、破線: EW 成分

<ケース 1 (参考)>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波 (全データ)  
 — 標準応答スペクトル

<記号の説明>  
 ΣW: 重み付け後のデータ数  
 σ<sub>0.02s</sub>: 周期 0.02 秒での標準偏差 (常用対数)  
 σ<sub>0.10s</sub>: 周期 0.1 秒での標準偏差 (常用対数)

Ave. = 非超過確率 50.0%  
 +1σ = 非超過確率 84.1%  
 +2σ = 非超過確率 97.7%



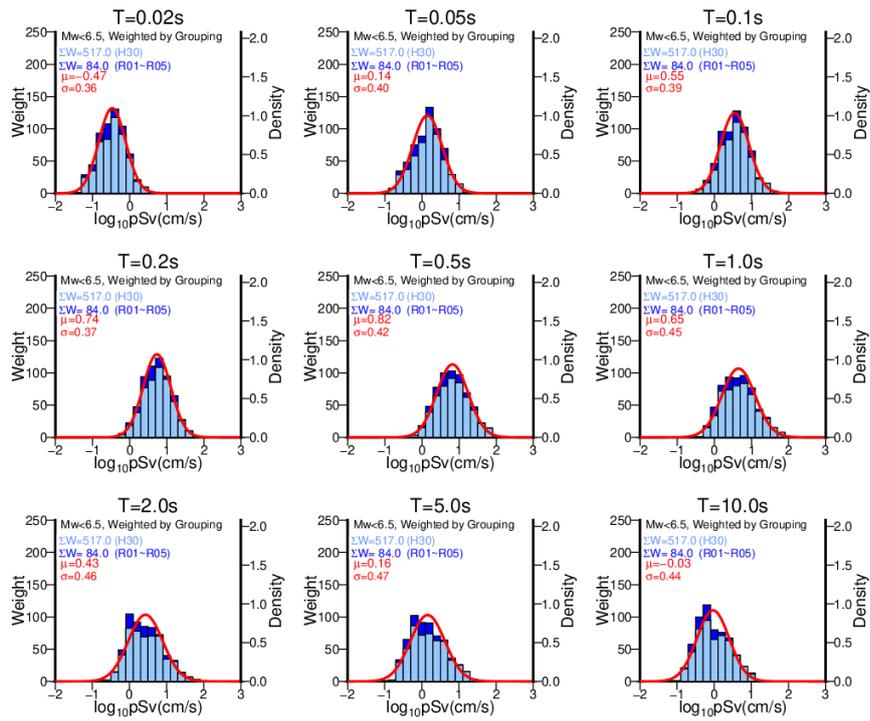
<ケース 2'a>  
 水色: データ数 (従来研究)  
 青色: データ数 (追加分)  
 赤色: 累積相対頻度 (水色・青色合算)

<ケース 1 (参考)>  
 灰色: データ数 (背面に表示)  
 緑色: 累積相対頻度 (灰色)

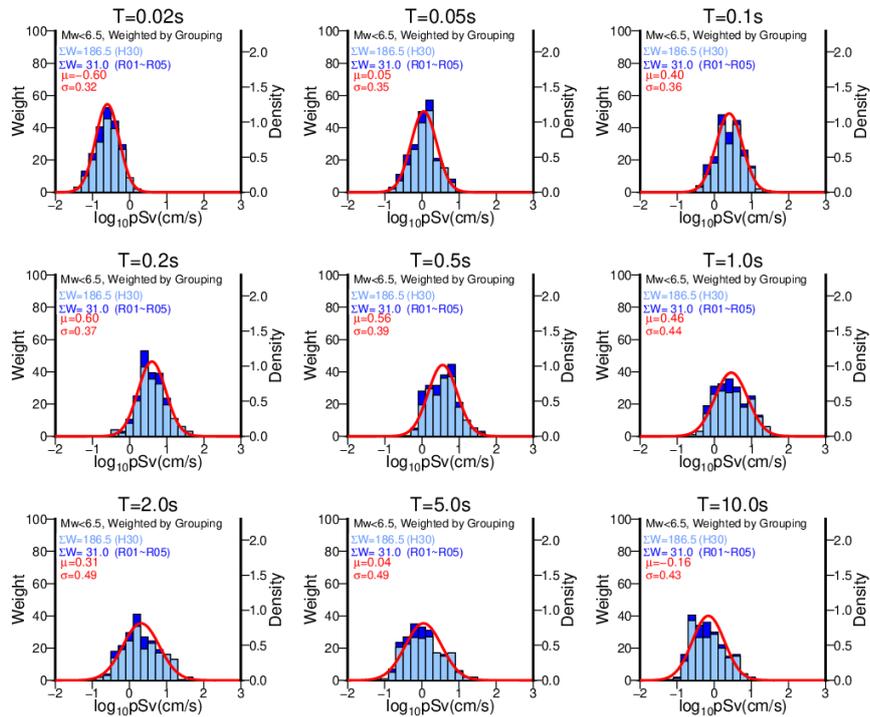
図 6.19 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 2'a (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0))

Figure 6.19 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 2'a (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))

< 水平動 >



< 上下動 >



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.20 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 2'a

Figure 6.20 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 2'a

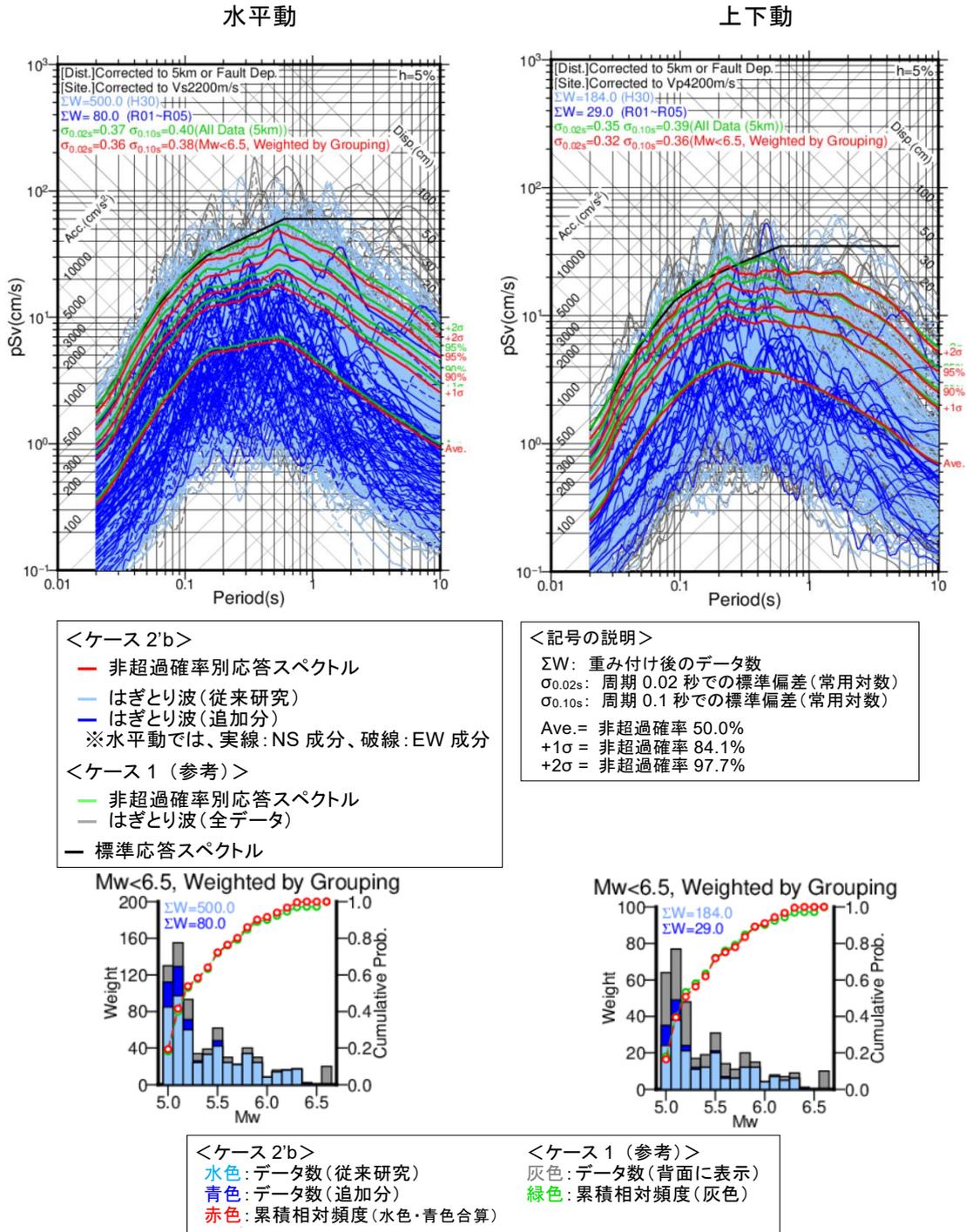
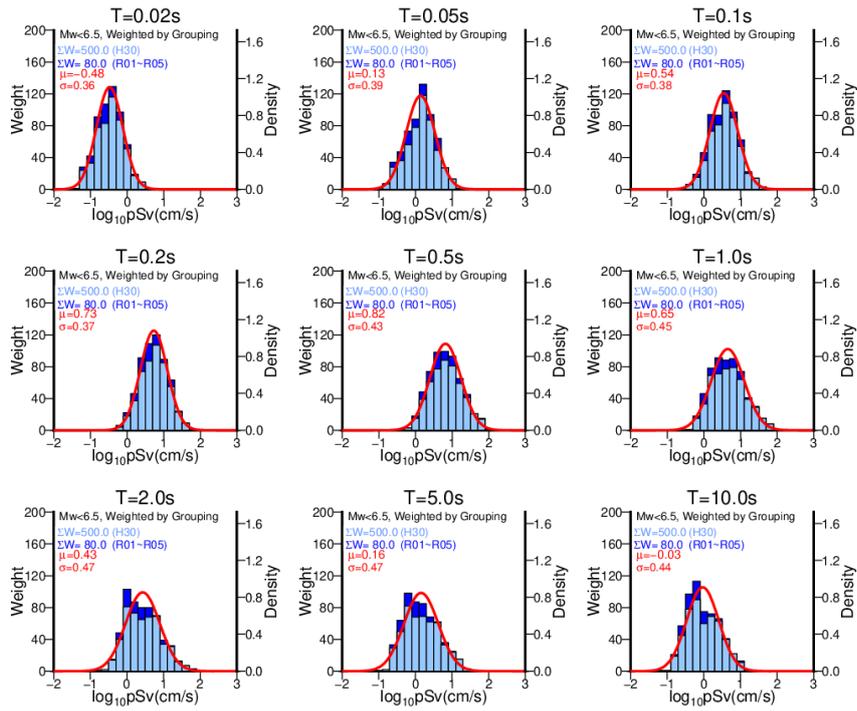


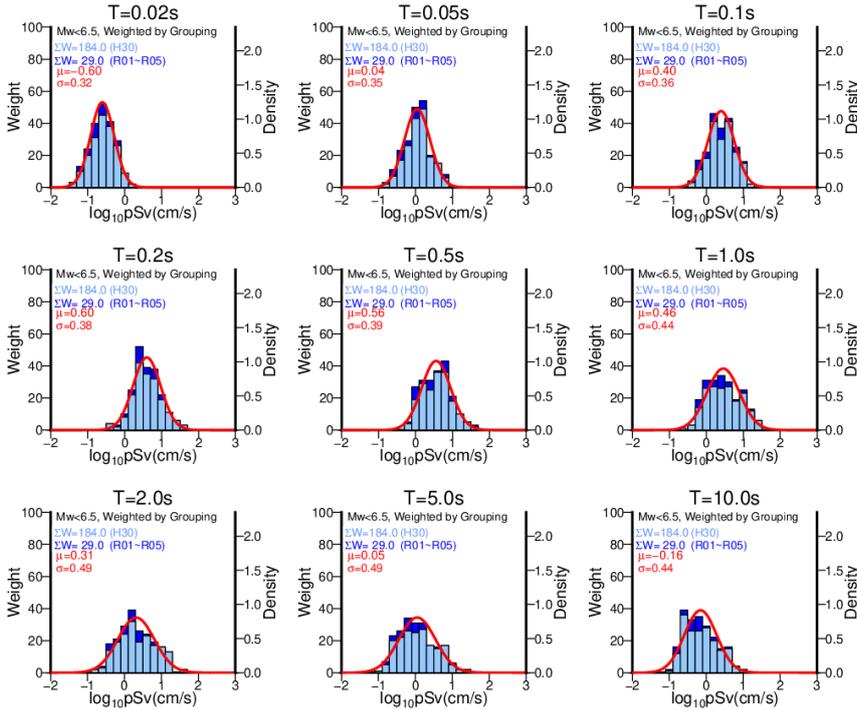
図 6.21 非超過確率別応答スペクトル (上段) 及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度 (下段) : ケース 2'b (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) )

Figure 6.21 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 2'b (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))

<水平動>



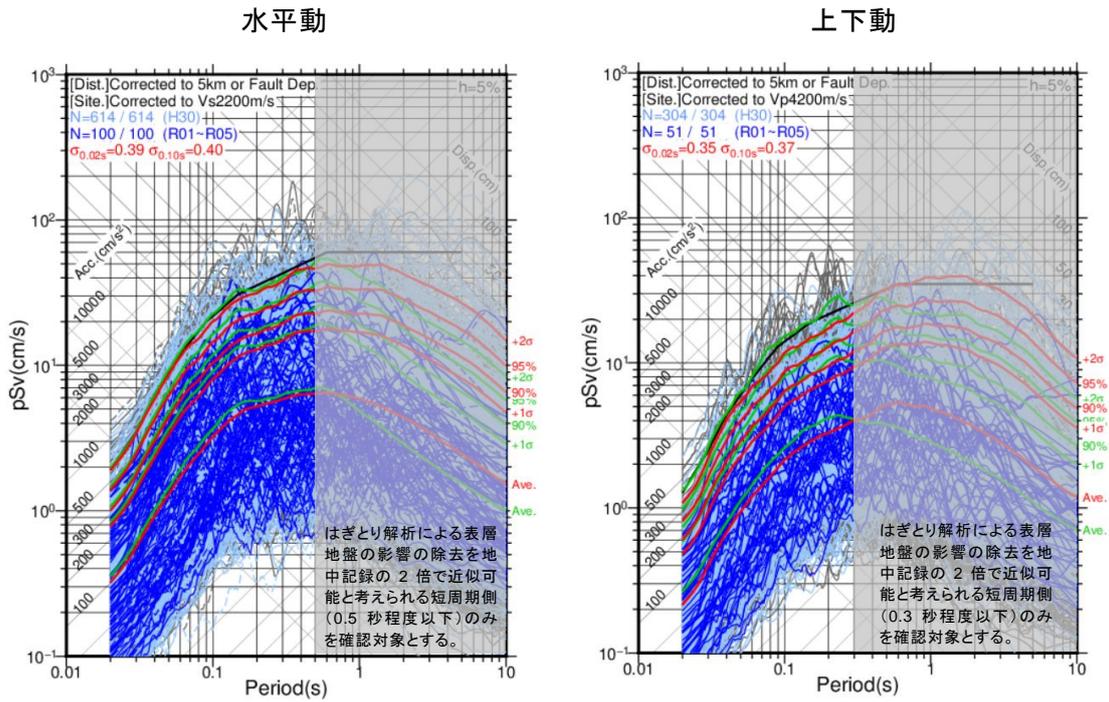
<上下動>



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

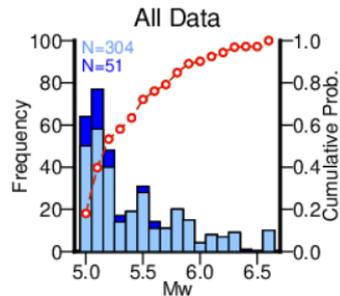
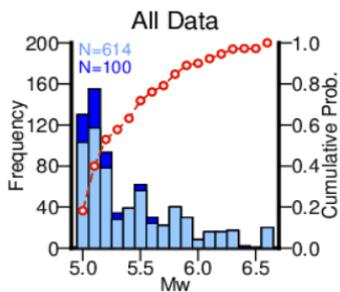
図 6.22 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 2'b

Figure 6.22 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 2'b



<ケース 4'>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — 地中観測記録(全データ)の2倍(従来研究)  
 — 地中観測記録(全データ)の2倍(追加分)  
 ※水平動では、実線: NS 成分、破線: EW 成分  
 <ケース 1 (参考)>  
 — 非超過確率別応答スペクトル  
 — はぎとり波(全データ)  
 — 標準応答スペクトル

<記号の説明>  
 $\Sigma W$ : 重み付け後のデータ数  
 $\sigma_{0.02s}$ : 周期 0.02 秒での標準偏差(常用対数)  
 $\sigma_{0.10s}$ : 周期 0.1 秒での標準偏差(常用対数)  
 Ave. = 非超過確率 50.0%  
 +1 $\sigma$  = 非超過確率 84.1%  
 +2 $\sigma$  = 非超過確率 97.7%

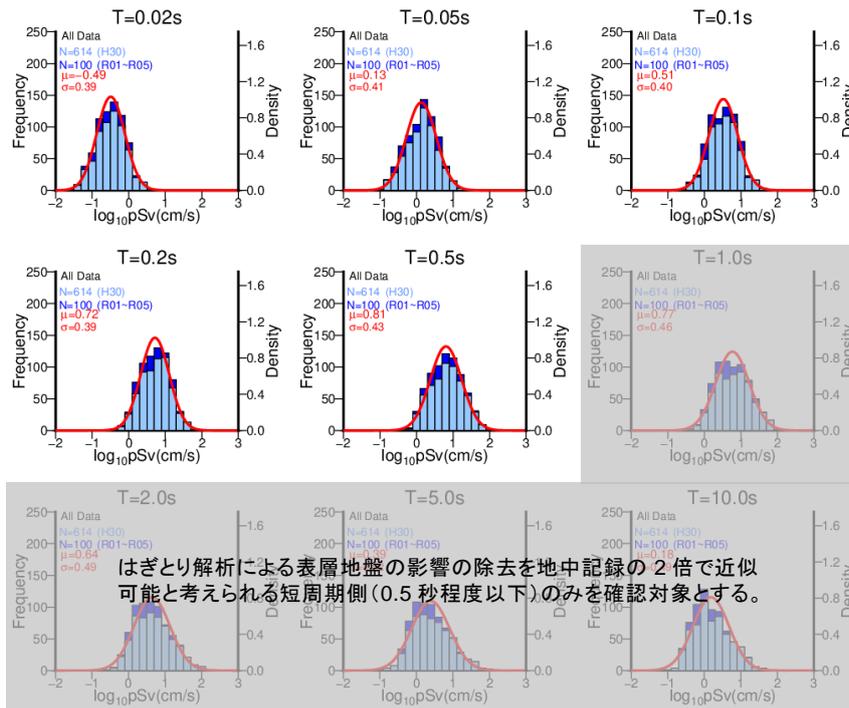


<ケース 4'>  
 水色: データ数(従来研究)  
 青色: データ数(追加分)  
 赤色: 累積相対頻度(水色・青色合算)  
 <ケース 1 (参考)>  
 灰色: データ数(背面に表示)  
 緑色: 累積相対頻度(灰色)

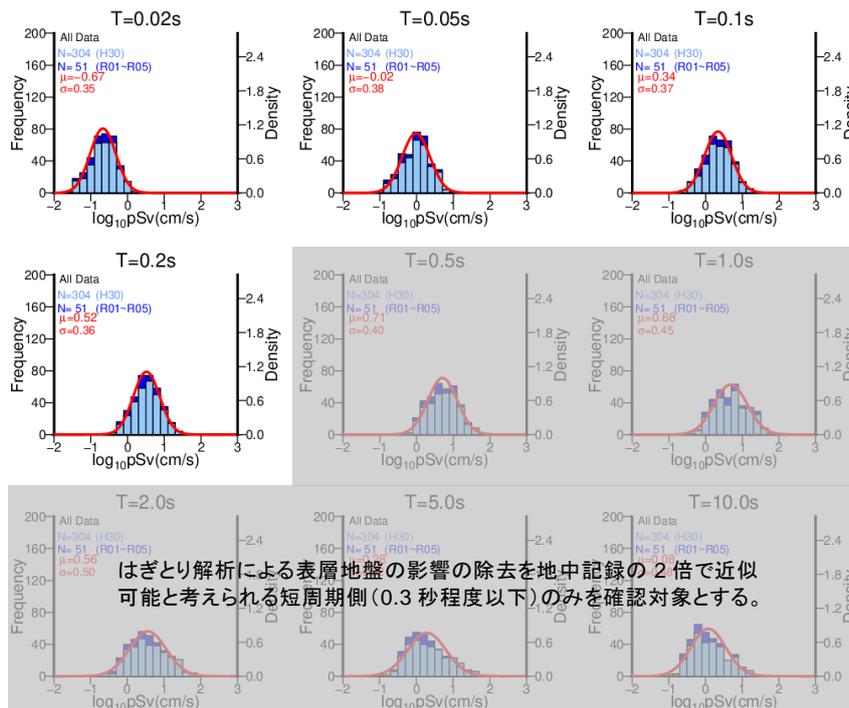
図 6.23 非超過確率別応答スペクトル(上段)及び地震規模別のデータ数分布と累積相対頻度(下段): ケース 4' (全データ、地中観測記録の 2 倍)

Figure 6.23 Response spectra for each non-exceedance probability (top) and magnitude-frequency distributions and cumulative probability plots (bottom): case 4' (twice the all downhole records)

<水平動>



<上下動>



水色：従来研究のデータ、青色：追加したデータ  
 赤色：全データ(灰色・青色)の平均及び標準偏差から対数正規分布を仮定して求めた確率密度関数

図 6.24 代表的な周期における地震動強さのヒストグラム及び確率密度関数の比較：ケース 4'

Figure 6.24 Comparison between histograms and probability density functions of ground-motion strength for typical periods: case 4'

## 7. 従来研究の結果との比較による標準応答スペクトルへの影響確認

6.で23年間（2000年～2022年）のデータを用いて算出した複数ケースの非超過確率別応答スペクトルについて、標準応答スペクトルの基となった検討チームにおける18年間（2000年～2017年）のデータを用いた同スペクトルの算出結果と比較を行い、5年間（2018年～2022年）の観測記録を追加することによる標準応答スペクトルへの影響を確認した。

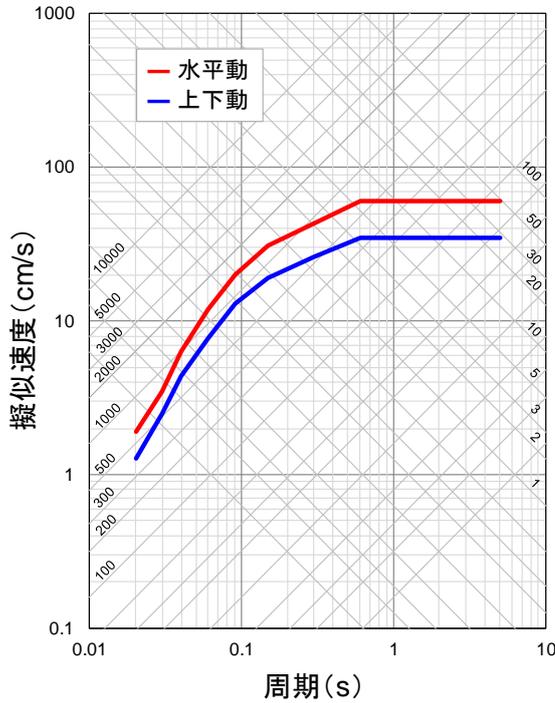
なお、検討チームにおいて、標準応答スペクトル（図7.1）の大きさは、主に以下の方針で、本研究と同様に算出した複数条件での非超過確率97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトルを基に設定された<sup>6</sup>。

- 非超過確率別応答スペクトルの算出ケースのうち、データの充足度が高く不確実さを低減させたケース2、3、4a、4b、及びはぎとり解析精度の確認用のケース2'a、2'b、4'を基に設定する（表6.1及び図7.2参照）。
- 一部周期帯で加藤スペクトル<sup>23</sup>を超える地震動が観測されていることから、短周期側で加藤スペクトル相当の地震動レベルとなる非超過確率95%のスペクトルを上回るレベルとすることを前提とする（図7.3）。
- 標準応答スペクトルのレベルが、地震動の年超過確率の $10^{-4}$ と $10^{-5}$ の間程度に対応していること、かつ、他の手法（特に距離減衰式）により求めた対象地震規模の上限に近いMw6.5相当の地震の震源近傍における地震動の平均に対して保守性を考慮したレベルであり、さらには「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価との連続性があることを確認することにより、妥当性を判断する。

図7.4～図7.14に、本研究及び従来研究において算出した各ケースの非超過確率別応答スペクトルの比較結果を示す。ここでは、標準応答スペクトル策定には使用されなかったケース1、5の結果も参考として示す。いずれのケースにおいても、本研究と従来研究の非超過確率97.7%応答スペクトルはほぼ同等の結果となった。ただし、ケース1、2、4、5では、周期1秒程度よりも長周期側においては、やや本研究の結果の方が小さい傾向があることが分かった。これには、図2.2に示すように、本研究で追加した15地震のうちMw6.4の1地震以外はMw5.0～5.6であり地震規模が相対的に小さいことが影響していると考えられる。一方、地震規模によるデータ数の偏りを軽減させるために理想的にG-R則に従うように重み付けをしたケース3の統計処理結果では、この長周期側での差異がほぼ解消されていることを確認した（図7.8）。

以上より、新たに起きた5年間（2018年～2022年）の地震の観測記録を統計処理に追加することが標準応答スペクトルの策定結果に与える影響はないと考えられる。

擬似速度応答スペクトル(h=5%)



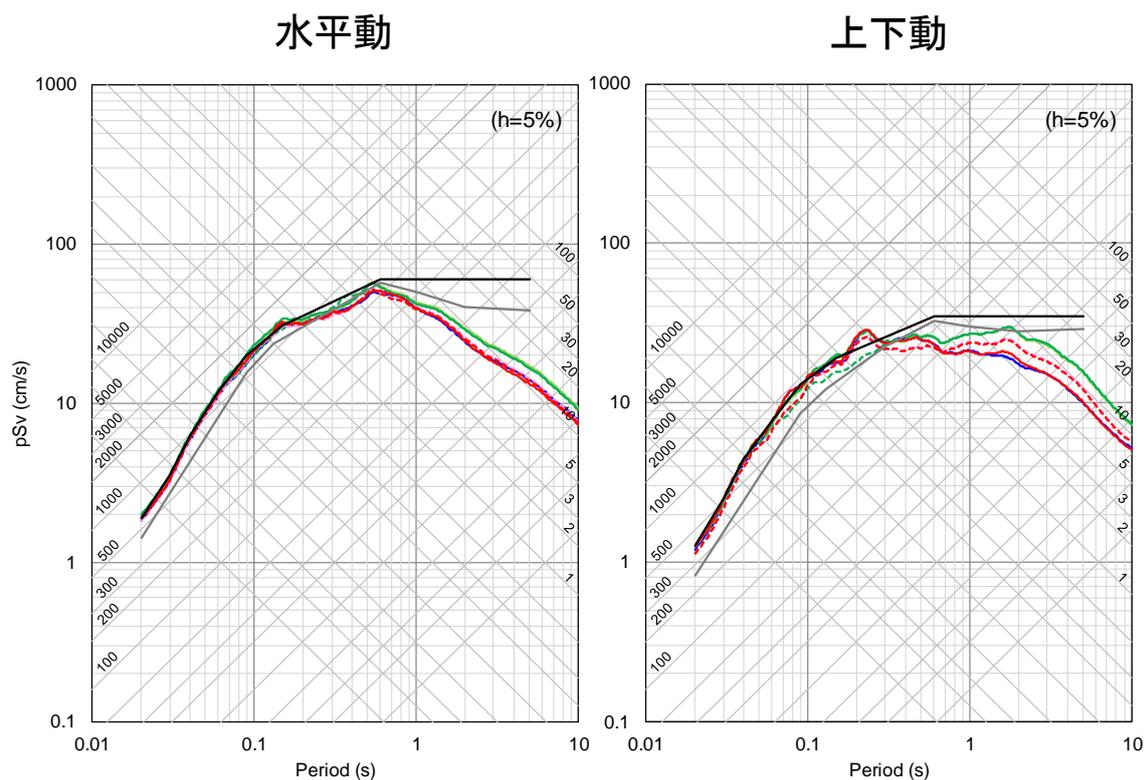
コントロールポイント

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

出典) 原子力規制委員会(2019)<sup>6</sup>より抜粋

図 7.1 地震基盤相当面 ( $V_s=2200$  m/s 以上) における標準応答スペクトルのコントロールポイント

Figure 7.1 Control points of the standard response spectra on the free surface equivalent to the hard bedrock ( $V_s \geq 2200$  m/s)



— 標準応答スペクトル  
 — 加藤スペクトル  
 (水平動: Vs=2200m/s、上下動: Vp=4200m/s)

<非超過確率 97.7%の応答スペクトル>

【標準応答スペクトルの設定に使用】

- ケース 2: 対象地震(Mw6.5 未満)
- ケース 3: 規模別の地震・記録数(G-R 則想定)
- ケース 4a: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その1  
 ※重み: Group A=1, B=1, C=0.5, D=0 の場合
- ケース 4b: はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その2  
 ※重み: Group A=1, B=1, C=0, D=0 の場合

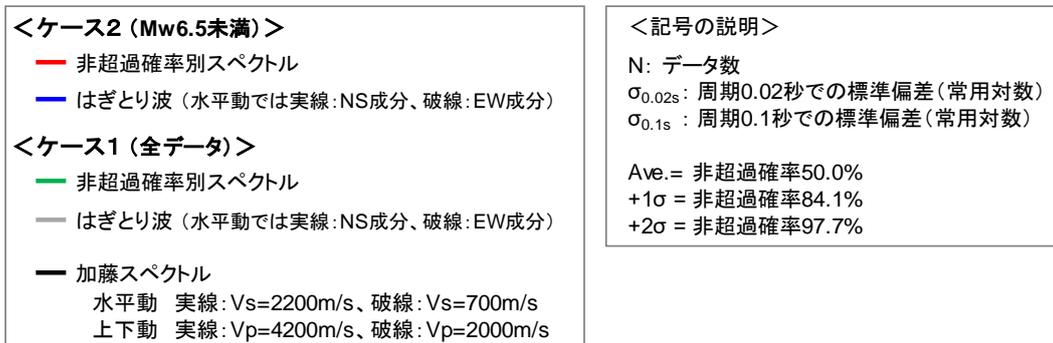
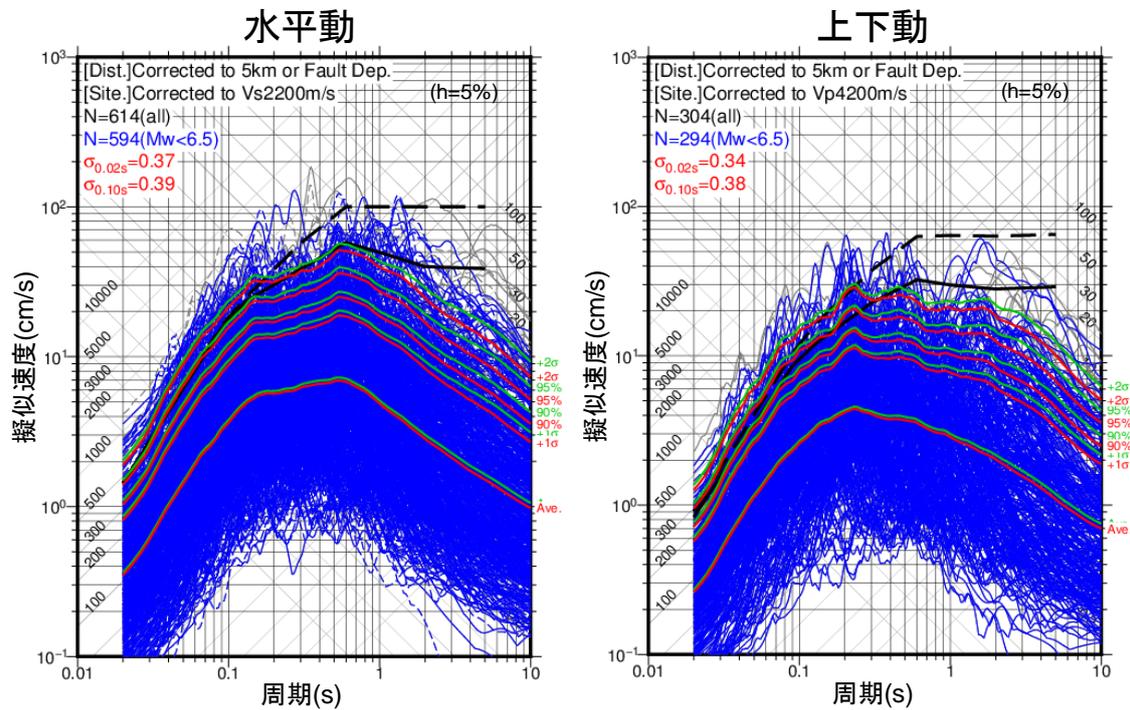
【はぎとり精度の確認に使用】

- - - ケース 2'a: 対象地震(Mw6.5 未満)、はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その1  
 ※重み: Group A=1, B=1, C=0.5, D=0 の場合
- - - ケース 2'b: 対象地震(Mw6.5 未満)、はぎとり精度(人工要因による特徴的な地震動の影響を低減) その2  
 ※重み: Group A=1, B=1, C=0, D=0 の場合
- - - ケース 4': はぎとり解析を行わずに地中観測記録を2倍した場合  
 ※水平動は周期 0.5 秒以下、上下動は周期 0.3 秒以下のみを表示

出典) 原子力規制委員会(2019)<sup>6</sup>の参考資料を基に作成

図 7.2 検討チームにおいて算出された非超過確率 97.7% (平均+2σ) の応答スペクトル  
 及び策定された標準応答スペクトル (従来研究の結果)

Figure 7.2 Response spectra with a non-exceedance probability of 97.7% (average +2σ) and the standard response spectra developed by the study team (results of the previous study)



出典) 原子力規制委員会(2019)<sup>6</sup>より抜粋

図 7.3 検討チームによる非超過確率別応答スペクトルの算出例: ケース 2 (Mw6.5 未満) とケース 1 (全データ) の比較 (従来研究の結果)

Figure 7.3 Example of calculating response spectra with each non-exceeding probability by the study team: Comparison of case 2 (Mw < 6.5) and case 1 (all data) (results of the previous study)

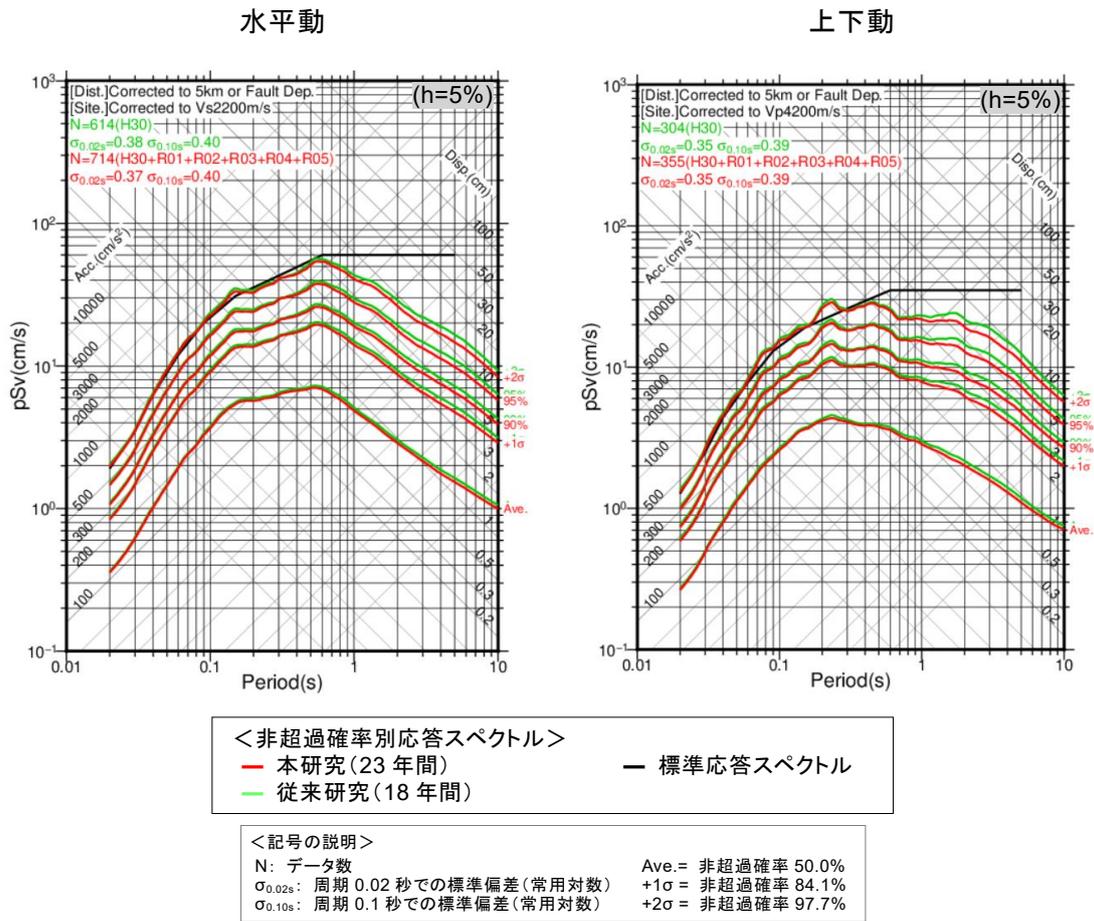


図 7.4 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1（全データ、補正あり）

Figure 7.4 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 1 (all data with adjustment)

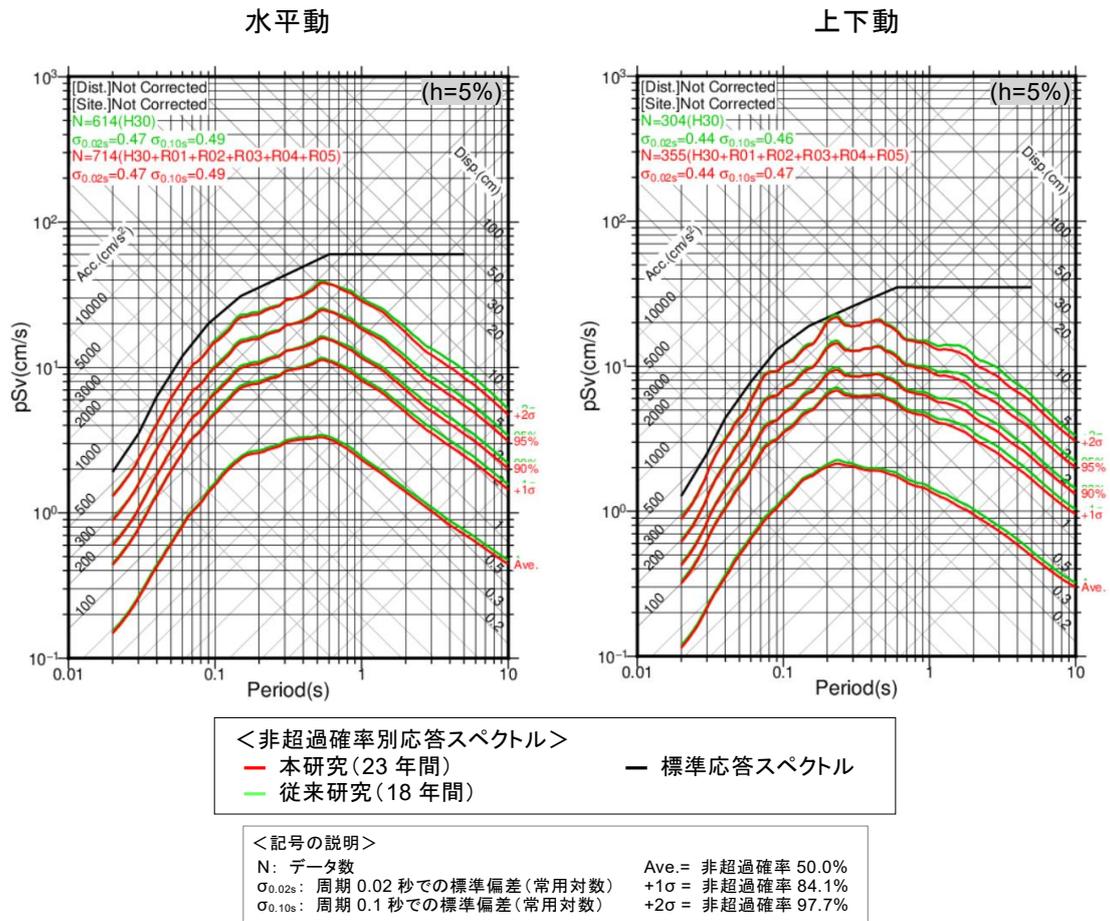


図 7.5 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1'a（全データ、補正なし）

Figure 7.5 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 1'a (all data without adjustment)

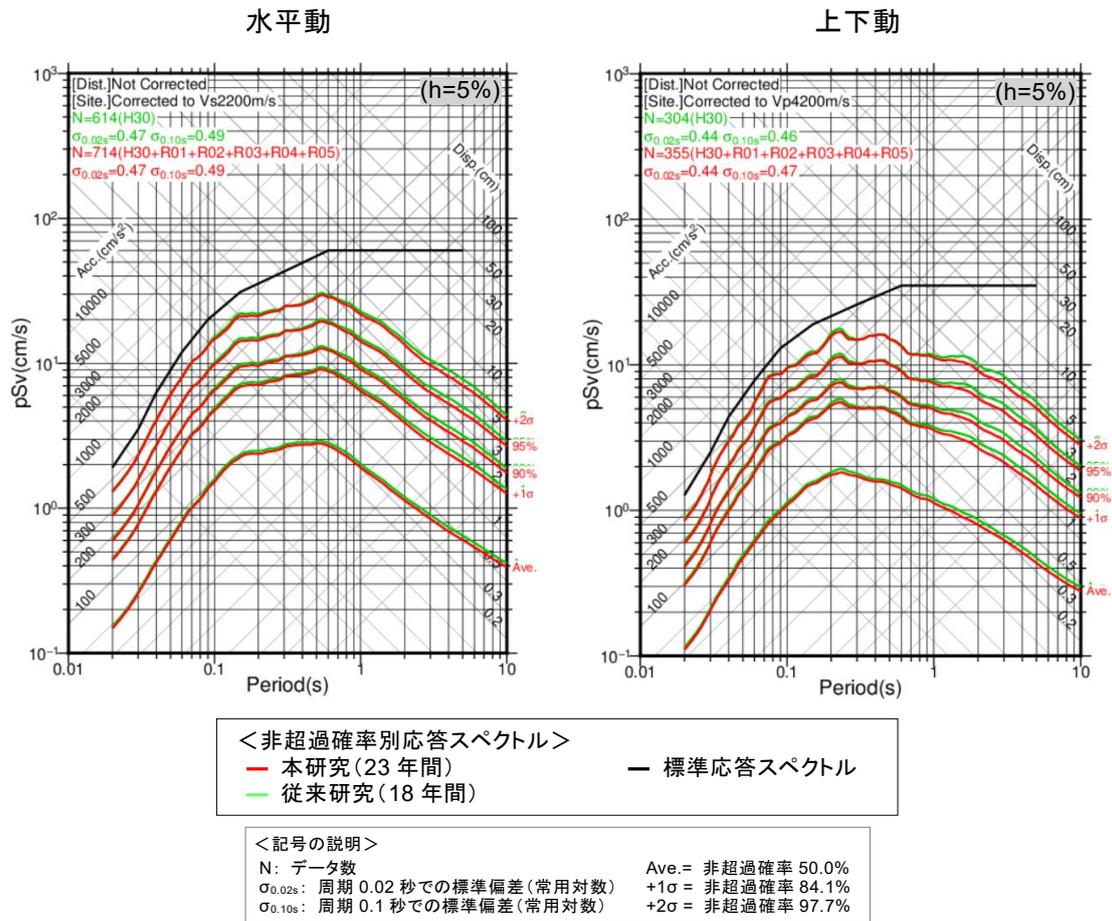


図 7.6 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1'b（全データ、地盤物性のみ補正）

Figure 7.6 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 1'b (all data adjusted only for the ground property)



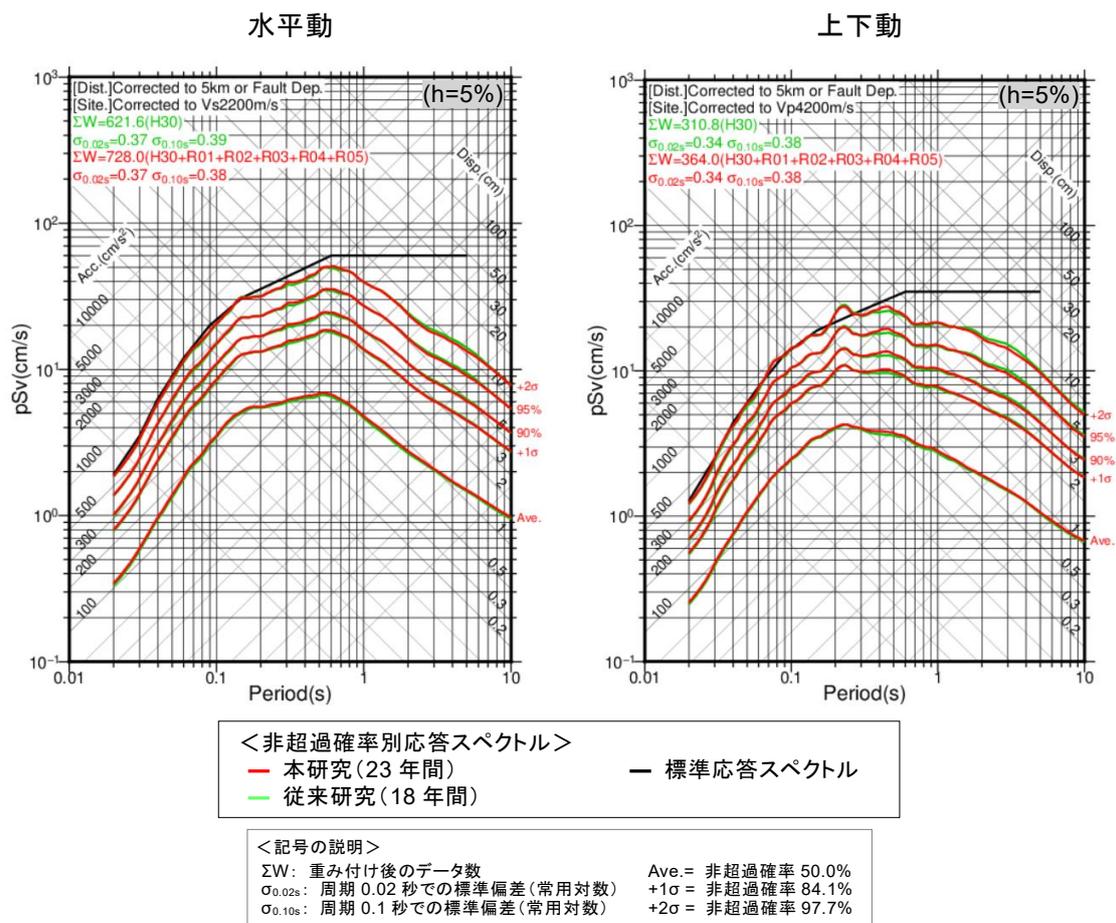


図 7.8 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 3（G-R 則想定  
の重み付け）

Figure 7.8 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in  
this study and the previous study: case 3 (weighting following the G-R law)

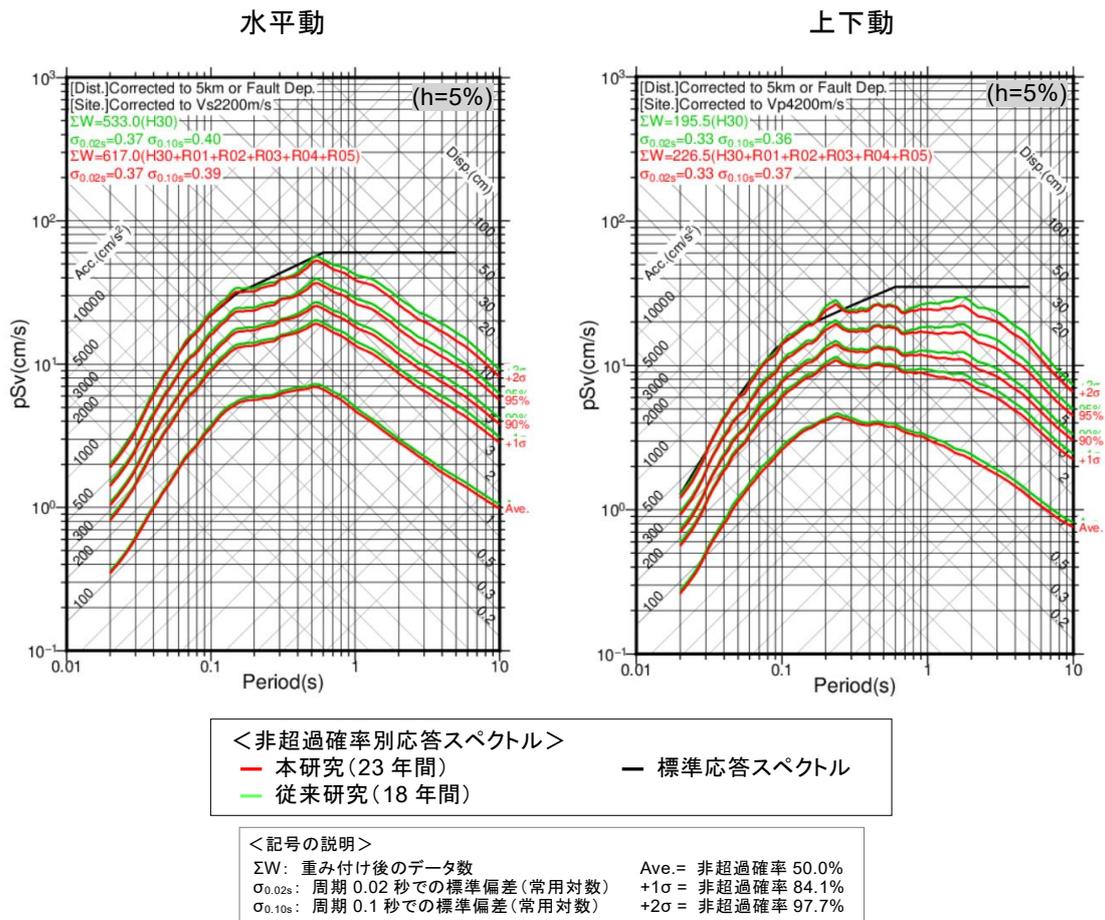


図 7.9 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4a（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0.5, D=0））

Figure 7.9 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 4a (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))

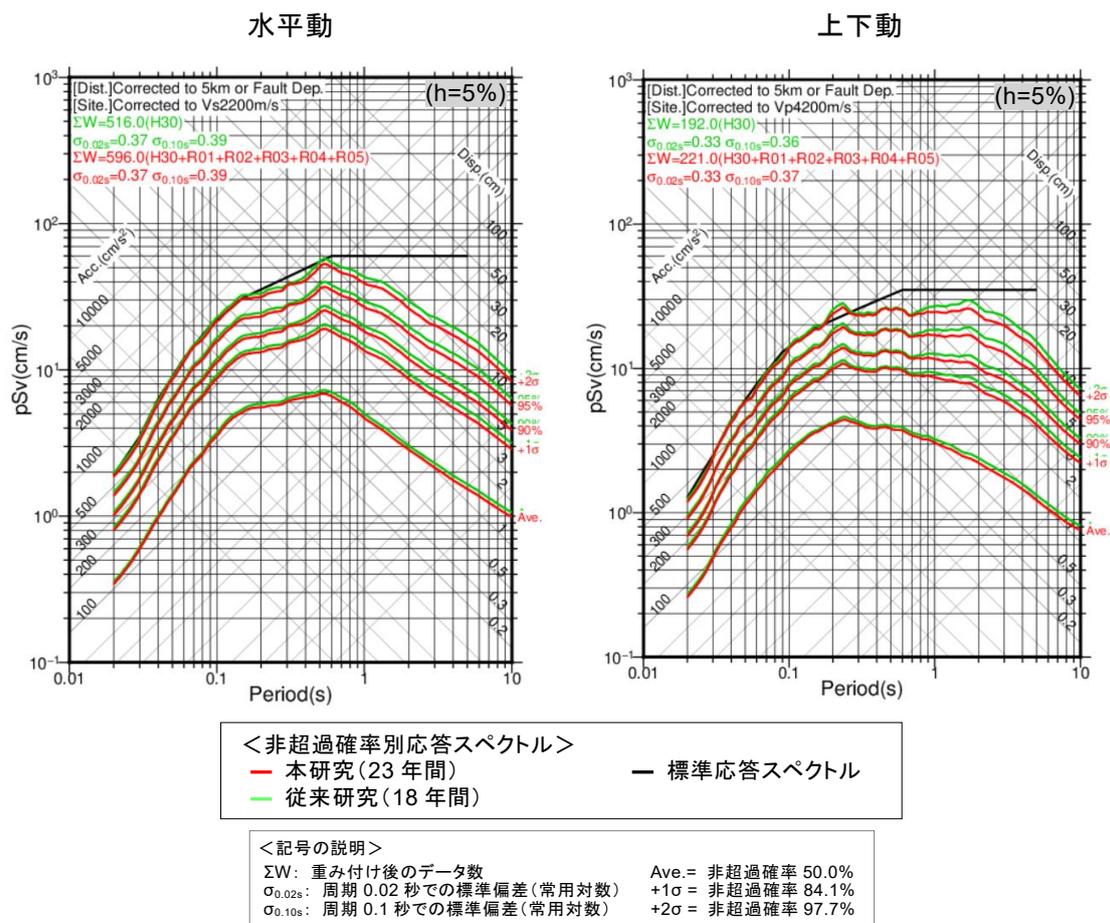


図 7.10 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4b（特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減（Group A=1, B=1, C=0, D=0））

Figure 7.10 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 4b (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))

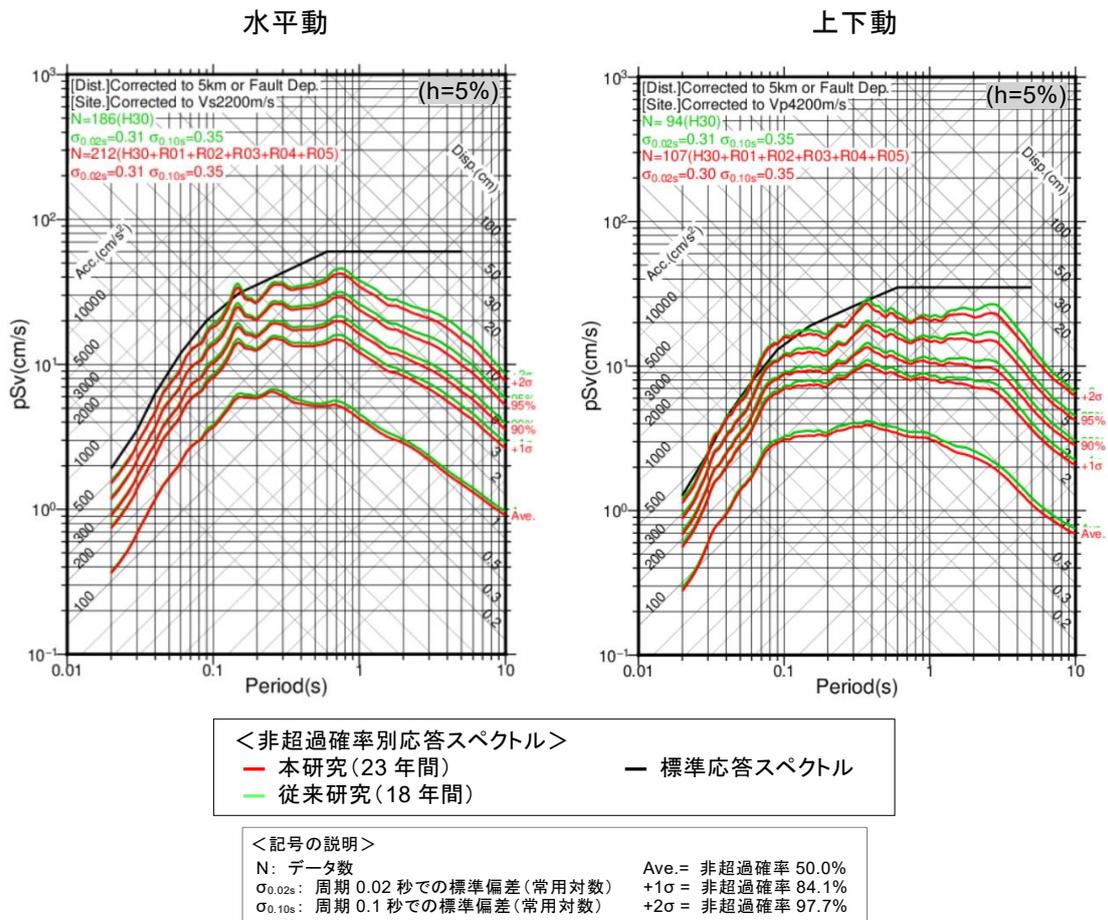


図 7.11 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 5 (Vs 2000 m/s 以上の地盤におけるデータのみ)

Figure 7.11 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 5 (only data on the ground with  $V_s \geq 2000$  m/s)

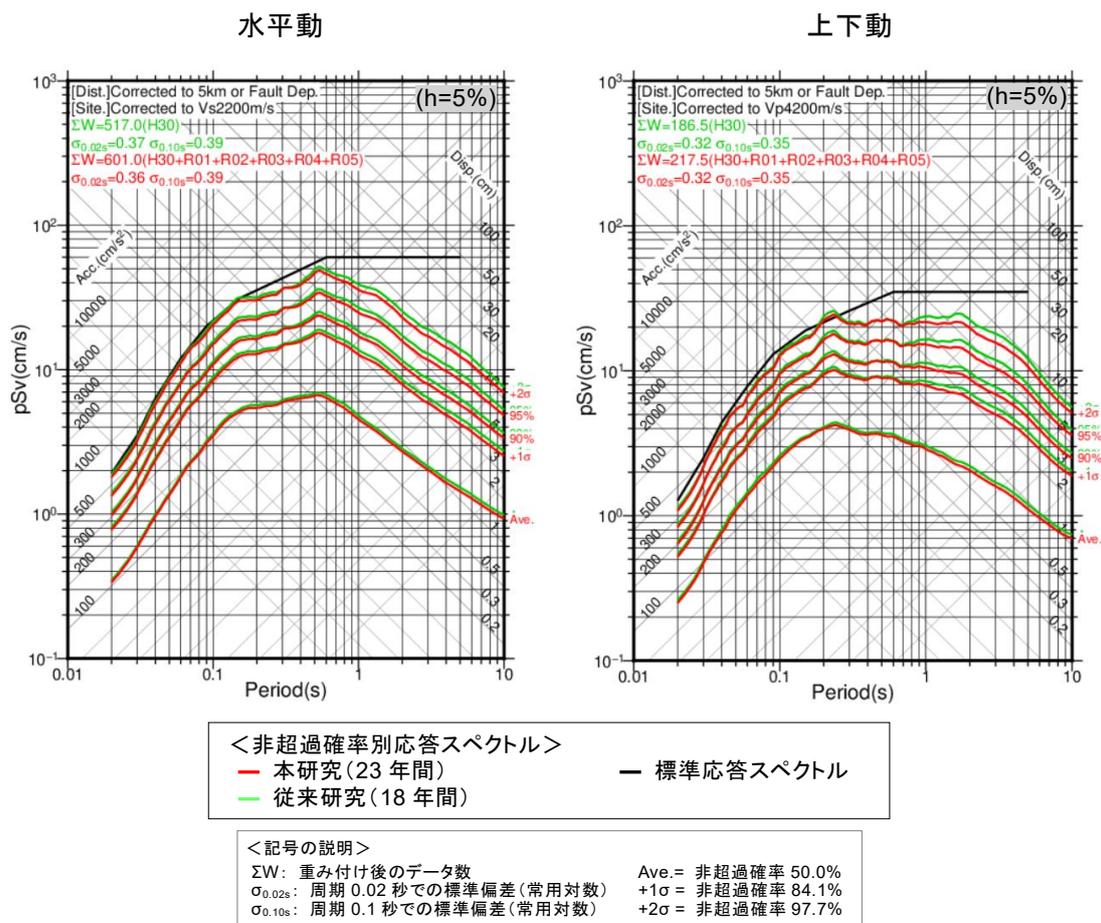


図 7.12 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'a (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0) )

Figure 7.12 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 2'a (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))

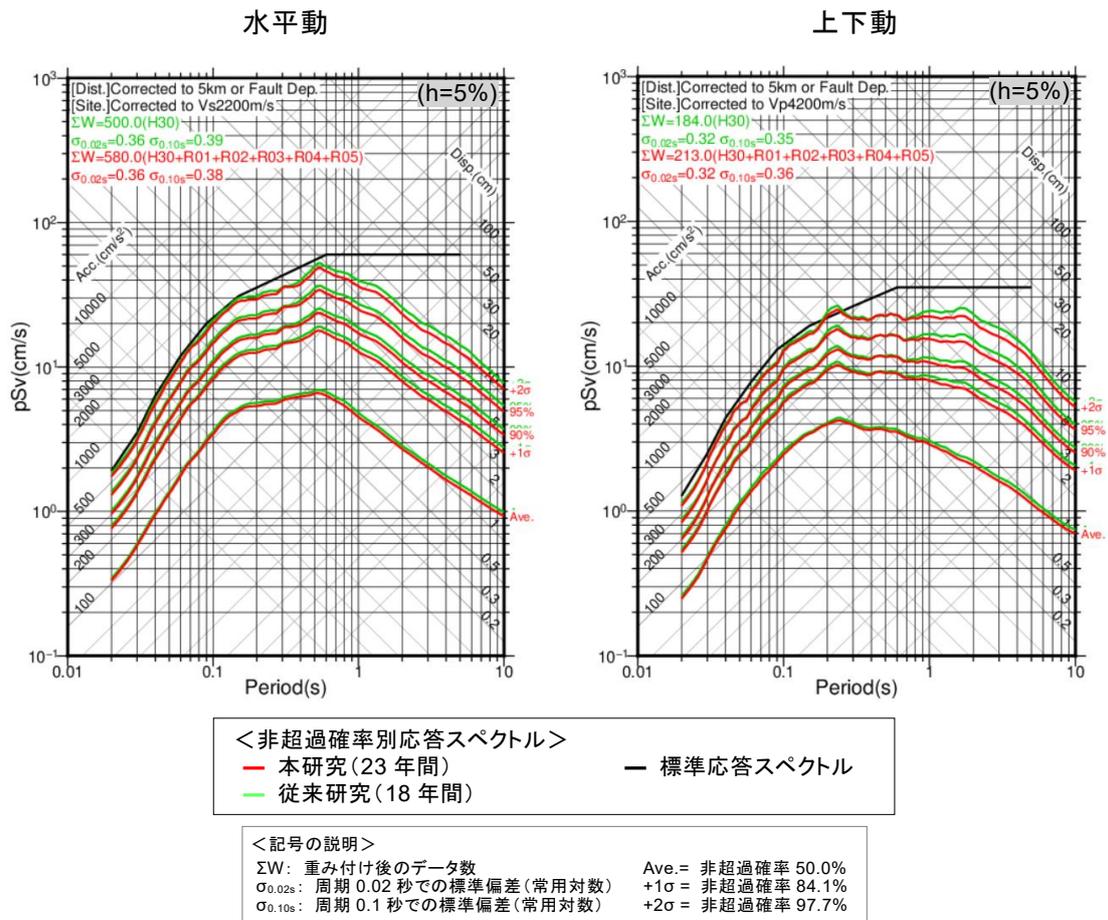


図 7.13 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'b (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) )

Figure 7.13 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 2'b (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))

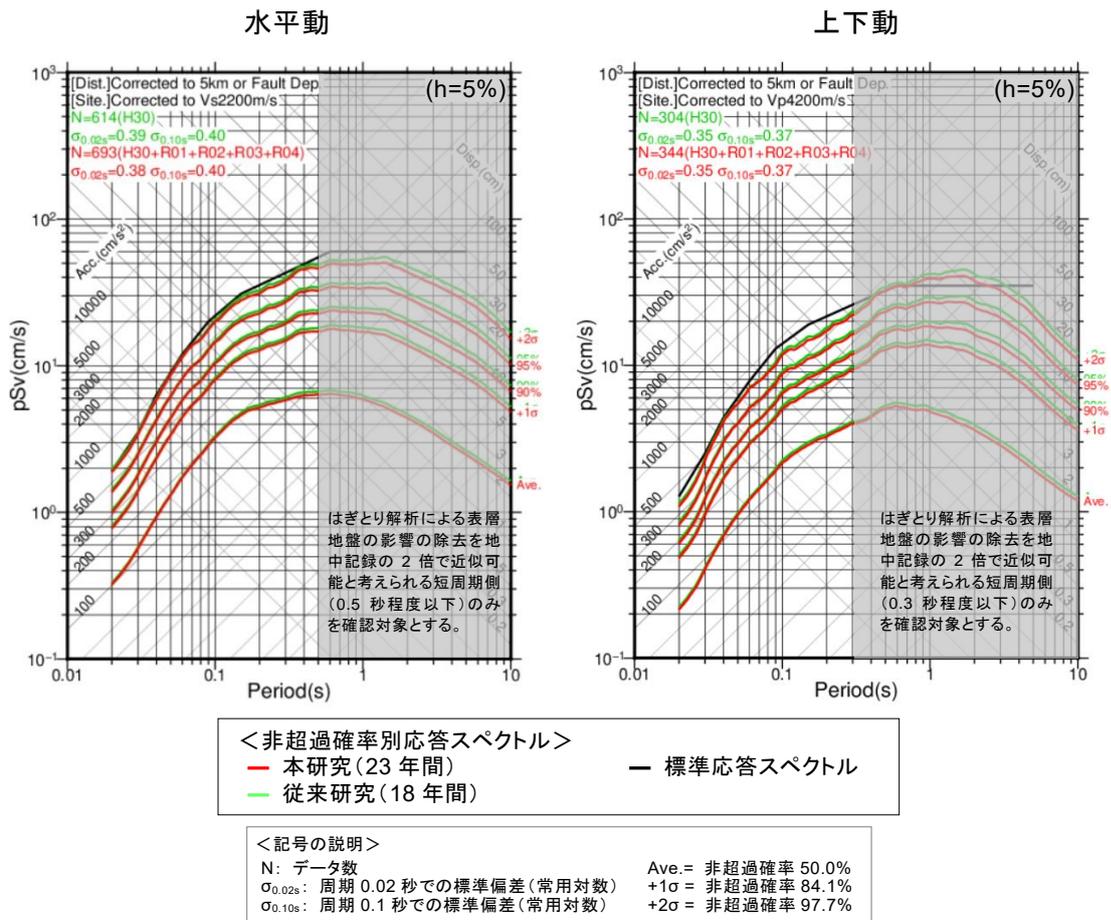


図 7.14 本研究及び従来研究の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4'（地中観測記録の 2 倍）

Figure 7.14 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability calculated in this study and the previous study: case 4' (twice the downhole records)

## 8. まとめ

検討チームと同様の条件及び手法<sup>6,9</sup>により、2018年から2022年までの5年間に起きた地震の観測記録を収集・解析し、それらの記録を従来のデータセットに追加して統計処理を行い、従来研究の結果と比較することにより、現行の標準応答スペクトルの妥当性を確認した。概要は以下のとおりである。

### (1) 地震動観測記録の収集・整理

2018年から2022年までの5年間に国内で起きたMw5.0～6.6の内陸地殻内地震を対象に、硬質地盤( $V_s$  500 m/s程度以上)に設置されたKiK-net観測点の地中地震計における震央距離30 km以内の観測記録を網羅的に収集し整理した(図 2.1)。

### (2) はぎとり解析及び応答スペクトルの補正

収集・整理した15地震の地中観測記録(水平動100記録、上下動51記録)について、地中地震計よりも上の地盤の影響を除去するための「はぎとり解析」を実施し、硬質地盤の解放面における地震動を算出した(図 3.1)。さらに、それらを震源近傍(半径10 km程度以内の領域)での地震基盤相当面( $V_s$  2200 m/s以上)における地震動として扱うために、地震動の応答スペクトルに「震源距離補正」及び「地盤物性補正」を施した(図 4.1、図 4.4)。

### (3) 統計処理のデータセットの確認

統計処理に用いる補正後の応答スペクトルについて、断層のタイプ(横ずれ断層、逆断層、正断層)、地中地震計位置の地盤の $V_s$ 、統計処理に用いる地震の数等の地震特性・観測条件に係る11項目の情報を整理(ラベル付け)してグループ分けを行った。従来研究と同様に、データセット(データ数)に極端又は非現実的な偏り等が生じていないことを確認した(表 5.2)。

### (4) 統計処理による非超過確率別の応答スペクトルの算出及び比較

本研究において算出した5年間(2018年～2022年)の15地震のはぎとり波のデータを、標準応答スペクトルを策定した従来研究における18年間(2000年～2017年)の89地震のデータ(水平動614記録、上下動304記録)に追加し、23年間(2000年～2022年)の104地震のデータ(水平動714記録、上下動355記録)に対して統計処理を行い、複数ケースの非超過確率別応答スペクトルを算出し、従来研究の結果と比較した(図 7.4～図 7.14)。その結果、本研究及び従来研究において算出した非超過確率別応答スペクトルは、周期1秒程度以上の長周期側ではわずかに小さいが、ほぼ同等であることを確認した。したがって、本研究における5年間の記録を追加した統計処理結果が、現行の標準応答スペクトルに与える影響はないという意味で、同スペクトルが妥当であることを確認した。

## 参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、“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”、2013.
- 2 原子力規制委員会、“基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド”、2013.
- 3 佐藤浩章、芝良昭、東貞成、功刀卓、前田宜浩、藤原広行、“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、研究報告 N13007、2013.
- 4 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」について（案）”、平成 29 年度第 52 回原子力規制委員会、資料 4、平成 29 年 11 月 29 日、2017.
- 5 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”、[https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokuteisezu\\_jishindo/2021.html](https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokuteisezu_jishindo/2021.html) (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 6 原子力規制委員会、“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”、震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム報告書、2019、[https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokuteisezu\\_jishindo/houkoku.html](https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokuteisezu_jishindo/houkoku.html) (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 7 原子力規制委員会、“標準応答スペクトルの規制への取り入れのための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解釈等の一部改正 一改正案に対する意見募集の結果及びこれを踏まえた修正並びに今後の対応一”、令和 3 年度第 5 回原子力規制委員会、資料 1、令和 3 年 4 月 21 日、2021.
- 8 国立研究開発法人防災科学技術研究所、“強震観測網 (K-NET, KiK-net) ”、<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 9 Tajima, R., Tanaka, H., and Wu, C., “An Empirical Method for Estimating Source Vicinity Ground-Motion Levels on Hard Bedrock and Annual Exceedance Probabilities for Inland Crustal Earthquakes with Sources Difficult to Identify in Advance”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, pp. 2408-2425, 2021.
- 10 国立研究開発法人防災科学技術研究所、“広帯域地震観測網 (F-net)”、<https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja> (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 11 気象庁、“地震・火山月報 (カタログ編) 震源データ”、<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/hypo.html> (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 12 Haskell, N. A., “Crustal reflection of plane SH waves”, Journal of Geophysical Research, Vol. 65, pp. 4147-150, 1960.
- 13 Haskell, N. A., “Crustal reflection of plane P and SV waves”, Journal of Geophysical Research, Vol. 67, pp. 4751-4767, 1962.

- 14 Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R., “Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps”, *Geophysics*, Vol. 39, pp. 770-780, 1974.
- 15 原子力安全基盤機構、“平成 24 年度 地震基盤における応答スペクトルの距離減衰式に適用する地盤増幅特性評価手法の検討 付録 E 「平成 20～23 年までに作成された硬質岩盤上距離減衰式のアップデート」”、2013.
- 16 Noda, S., Yasiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., and Watanabe, T., “Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites”, *OECD Workshop on the Relations between Seismological DATA and Seismic Engineering*, pp. 399-408, 2002.
- 17 加藤研一、武村雅之、八代和彦、“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、第 51 巻、pp. 123-138、1998.
- 18 Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A., “Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion”, *Seismological Research Letters*, Vol. 70, pp. 59-80, 1999.
- 19 今泉俊文、宮内崇裕、堤浩之、中田高、“活断層詳細デジタルマップ [新編]”、東京大学出版会、2018.
- 20 国立研究開発法人防災科学技術研究所、地震ハザードステーション (J-SHIS)、<https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/> (2024 年 4 月 25 日確認) .
- 21 Morikawa, N., and Fujiwara, H., “A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake”, *Journal of Disaster Research*, Vol. 8, pp. 878-888, 2013.
- 22 Gutenberg, B., and Richter, C. F., “Frequency of earthquakes in California”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34, pp. 185-188, 1944.
- 23 加藤研一、宮腰勝義、武村雅之、井上大榮、上田圭一、壇一男、“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ー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ー”、*日本地震工学会論文集*、4 巻、4 号、pp. 46-86、2004.
- 24 気象庁、“地震・火山月報 (防災編)”、<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/gaikyo/> (2024 年 4 月 25 日確認) .

## 執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門  
田島 礼子 主任技術研究調査官

## 付録1 震源距離補正の手法を変えた場合の結果との比較

4.1 における震源距離補正では、従来研究の手法と同様に、応答スペクトルを半径 10 km 程度の震源近傍の領域内の大きさに補正するために、やや保守的（結果が大きく）な設定を採用した。本付録では、従来研究における震源距離補正の設定について、保守性の度合いを確認するために、標準応答スペクトルを策定した従来研究と同様のデータセットを対象に、以下のように、本研究及び従来研究で採用した保守性を考慮した方法（方法 A）に加え、観測点配置のばらつきを考慮した補正方法（方法 B）を試行し、補正方法の違いが統計処理結果に与える影響について確認した。

- ・方法 A（採用）：最短距離 5 km 程度に観測点を近づけることを基本とする方法（4.1 参照）。この方法では、観測点が一律的に最短距離 5km に近づくように、応答スペクトルの大きさが補正される。
- ・方法 B（試行）：収集時には震央距離 30 km 以内に分布している観測点を、それぞれ 1/3 倍の震央距離に近づけることにより、半径（震央距離）10 km 以内の領域に観測点がばらつきを持って（ランダム的に）分布するように補正する方法。この方法では、震央距離 30 km 以内における元々の観測点配置が保持されたまま距離が近づくように、応答スペクトルの大きさが補正される。

方法 A による補正後の距離の設定方法は図 4.2 及び図 4.3 に示すとおりである。この方法では、最短距離が 5 km に近づいたと仮定して応答スペクトルの大きさを補正することを基本とした（図 4.2 a）。ただし、補正前の最短距離が元々 5 km より近い場合には補正を施さないこととした（図 4.2 b）。震源断層の上端深さ（点震源を仮定する場合は震源深さ）が 5 km より深い場合には、観測点を断層直上に水平移動させた震源からの最短距離を補正後の距離とした（図 4.2 c）。

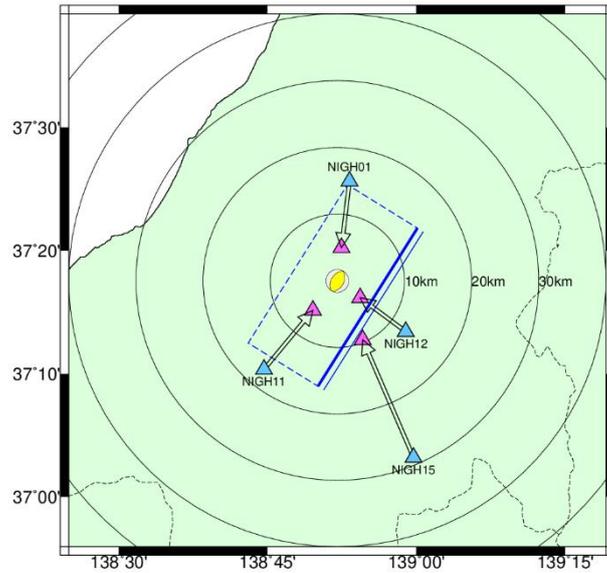
方法 B により、半径 10 km 程度の領域内に観測点がばらつきを持って分布するように観測点を近づけた例を付図 1.1 に示す。この方法では、収集対象の震央距離 30 km 以内に分布する KiK-net 観測点に対して、それぞれ震央距離が 1/3 となる位置に観測点を移動させた上で、さらに、移動後の位置における震源（面震源又は点震源）からの最短距離を計算し、その距離を補正後の最短距離として、応答スペクトルの大きさを補正した。なお、震源設定、最短距離等は従来の方法 A の考え方（図 4.1～図 4.3）を応用した。

補正方法の違いによる最短距離ごとのデータ数については、方法 A による補正後の距離は 5 km に補正されるデータが多く、方法 B による補正後の距離は 8～10 km 程度を中心に幅のあるデータ分布となった（付図 1.2）。

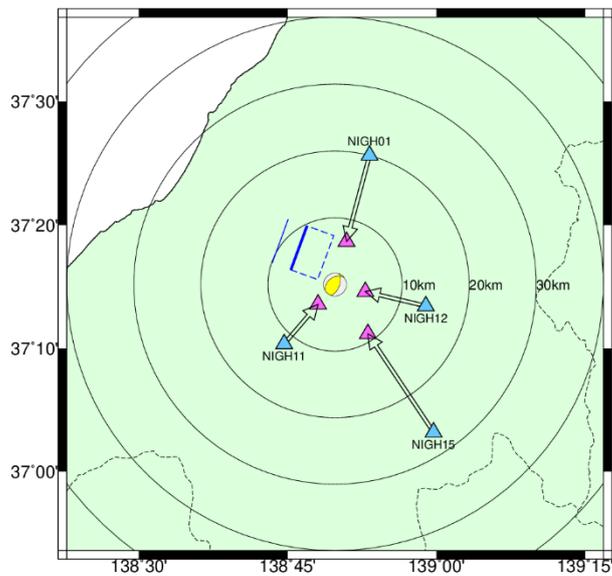
付図 1.3～付図 1.11 に、方法 A（採用）及び方法 B（試行）によりそれぞれ補正したデータセットを用いて、6.と同様の統計処理により算出したケース 1～5 の非超過確率別

応答スペクトルの比較結果を示す（方法 A による結果は 6. と同様）。いずれのケースについても、方法 A の結果は方法 B よりも、平均値（非超過確率 50%）は大きい、標準偏差は小さい。これは、方法 A の方が方法 B よりも補正後の距離が近いデータが多いため平均値は大きくなるが、方法 A は同じ距離（原則 5 km）に補正されるデータが多いため、ばらつき（標準偏差）は小さいことに対応する。そのような関係により、非超過確率が大きくなる程、両者の差異は小さくなり、非超過確率 97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトルについては、方法 B の応答スペクトルは方法 A の応答スペクトルよりもやや小さい結果となった。

従って、標準応答スペクトル策定の際に採用した非超過確率 97.7%（平均+2 $\sigma$ ）の応答スペクトルの結果については、補正方法を変えた場合、やや小さい地震動レベルになるが大きな差異ではないことが分かったため、従来手法（手法 A）は保守的ではあるが過度な設定になっていないことを確認することができた。



(a) 2004年10月23日17:56の新潟県中越地方の地震



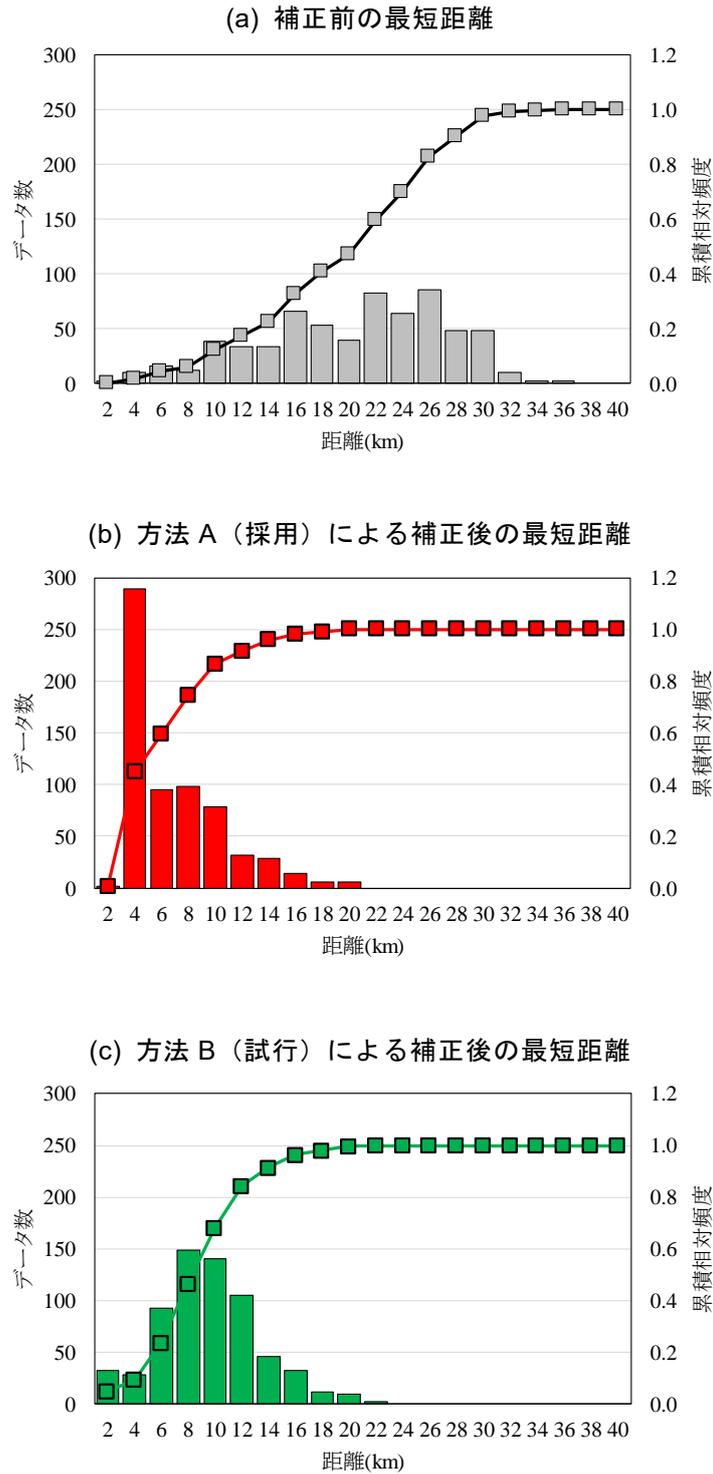
※断層モデルの設定で参照した文献においてDD法等により震源位置を推定しており、気象庁の震源位置と異なる場合がある。  
 (断層モデルと震央の位置が顕著に異なるのはこの地震のみ)

(b) 2004年10月23日18:11の新潟県中越地方の地震

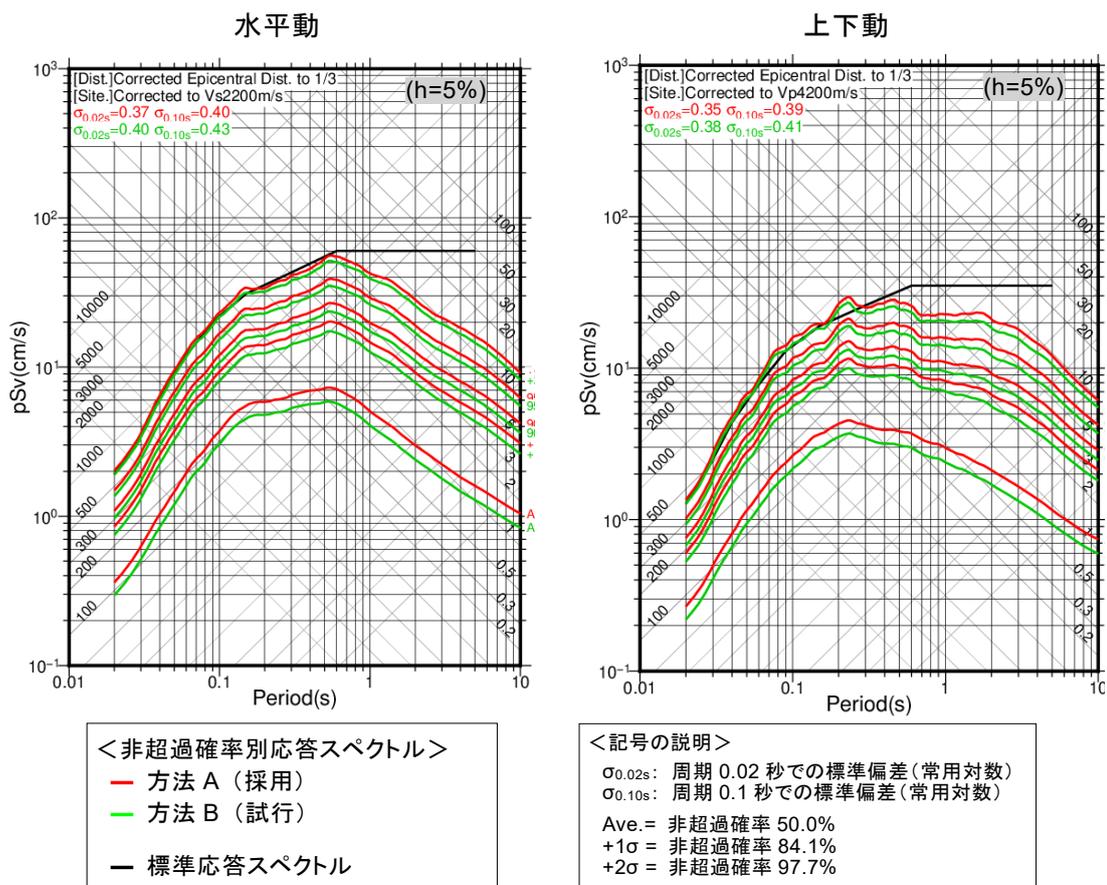
▲: 移動前の観測点位置    ▲: 移動後の観測点位置  
 ●: 震央位置    □: 設定した断層モデル

付図 1.1 方法 B (試行) による震源距離補正の例

Appended Figure 1.1 Example of the source-station distance adjustment by method B (trial)

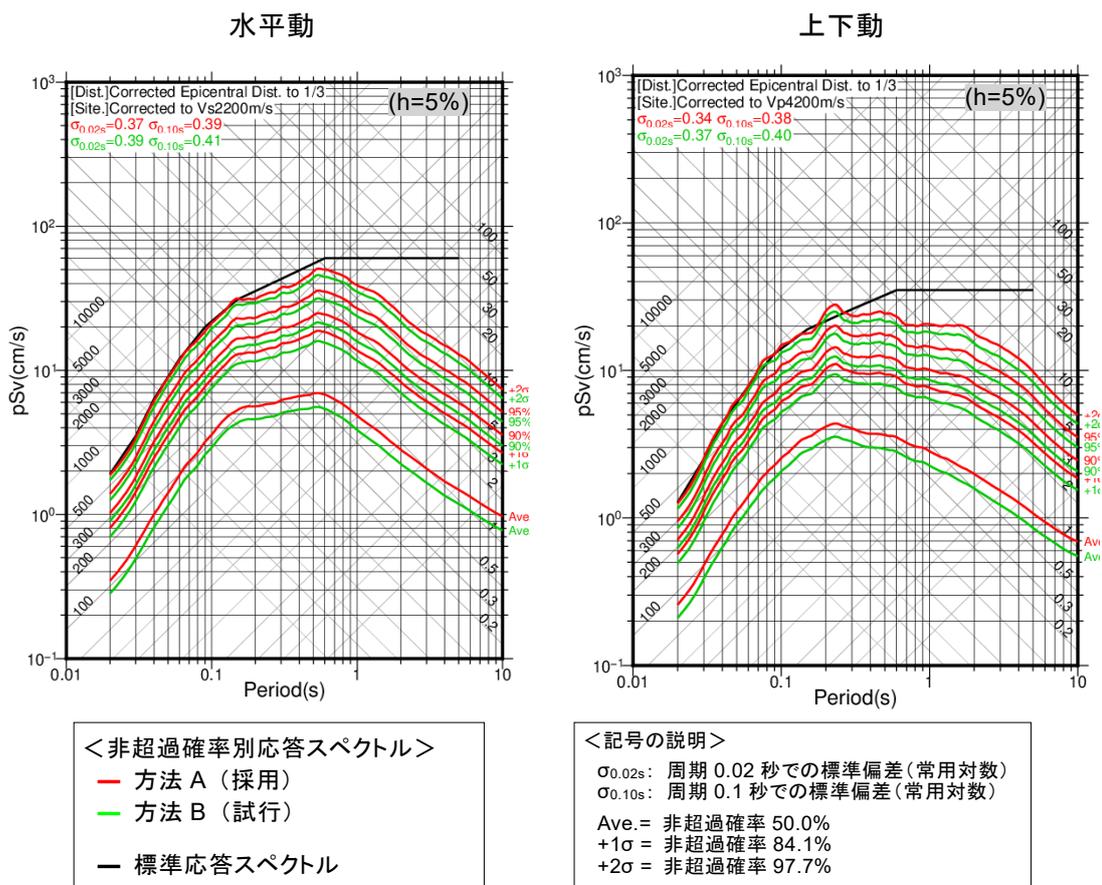


付図 1.2 補正前後の最短距離別の頻度分布及び累積相対頻度 (水平動の例)  
 Appended Figure 1.2 Frequency distributions and cumulative probability plots of shortest distance before and after the adjustment (example of horizontal ground-motion)



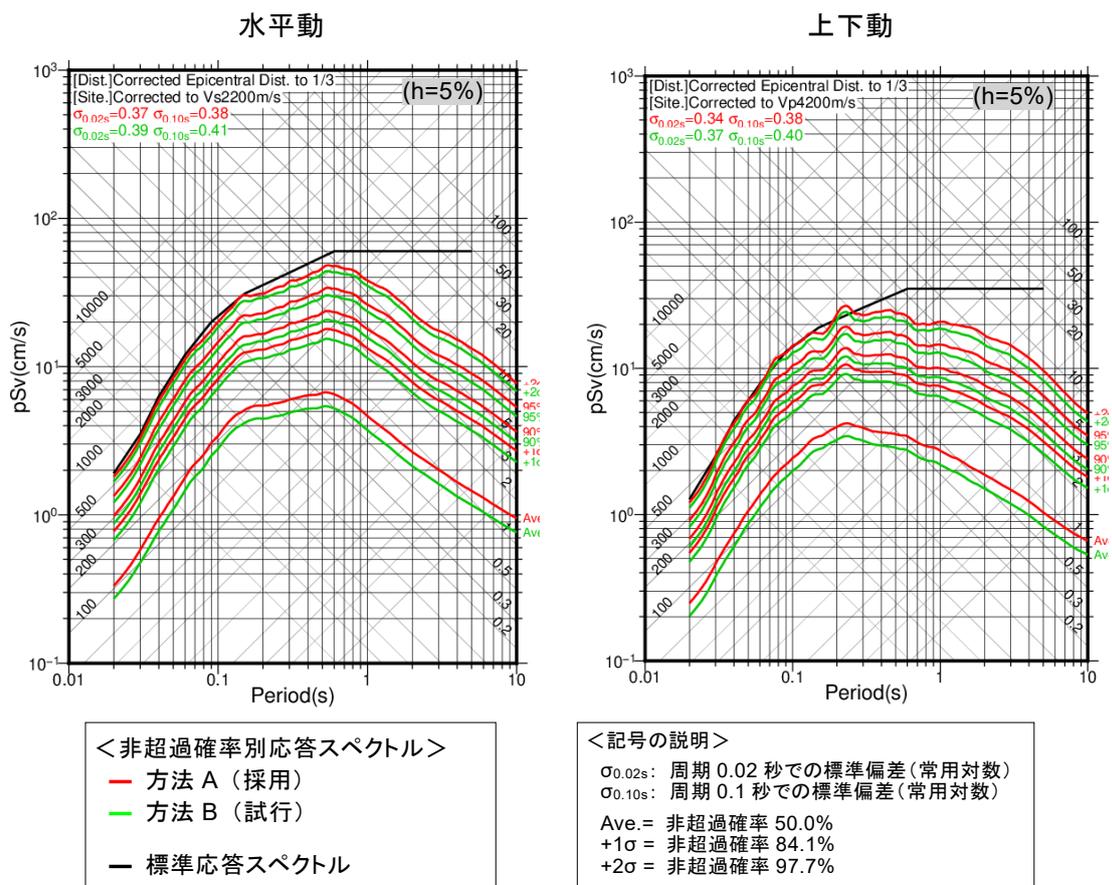
付図 1.3 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 1 (全データ、補正あり)

Appended Figure 1.3 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 1 (all data with adjustment)



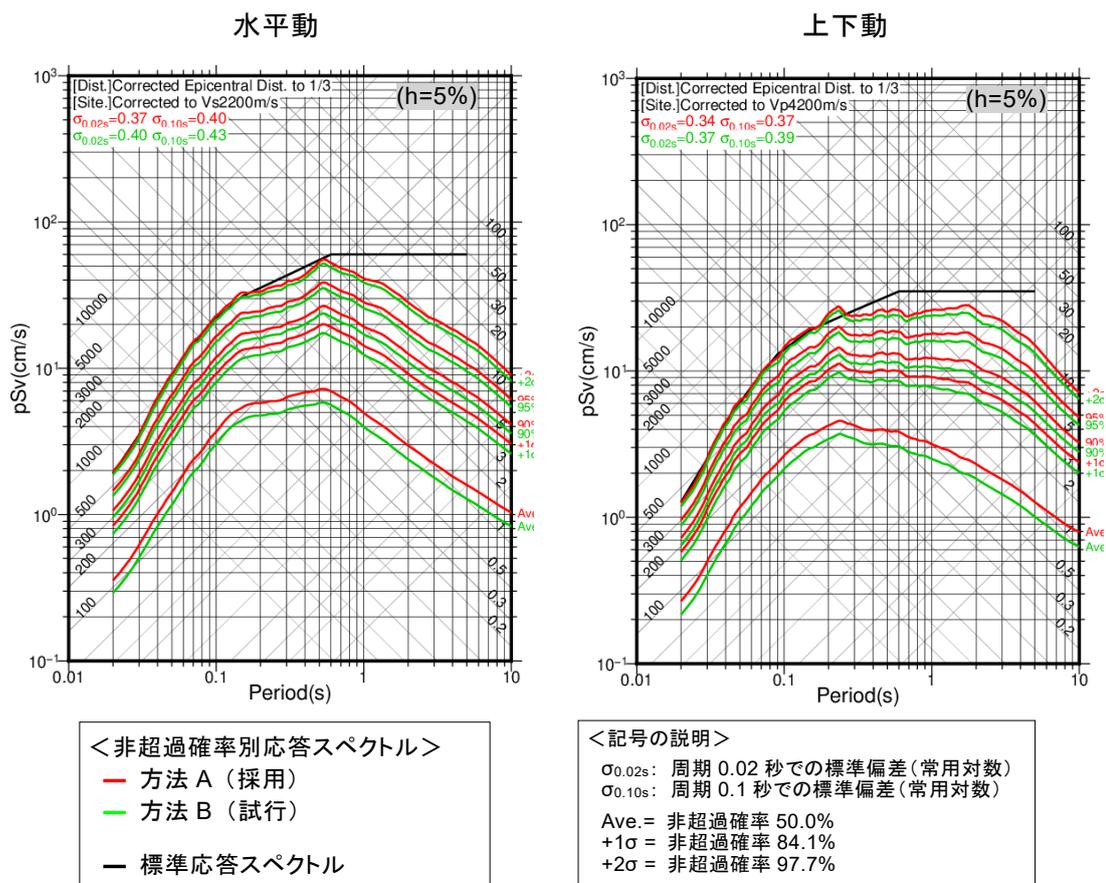
付図 1.4 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2 (Mw6.5 未満)

Appended Figure 1.4 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 2 (Mw < 6.5)



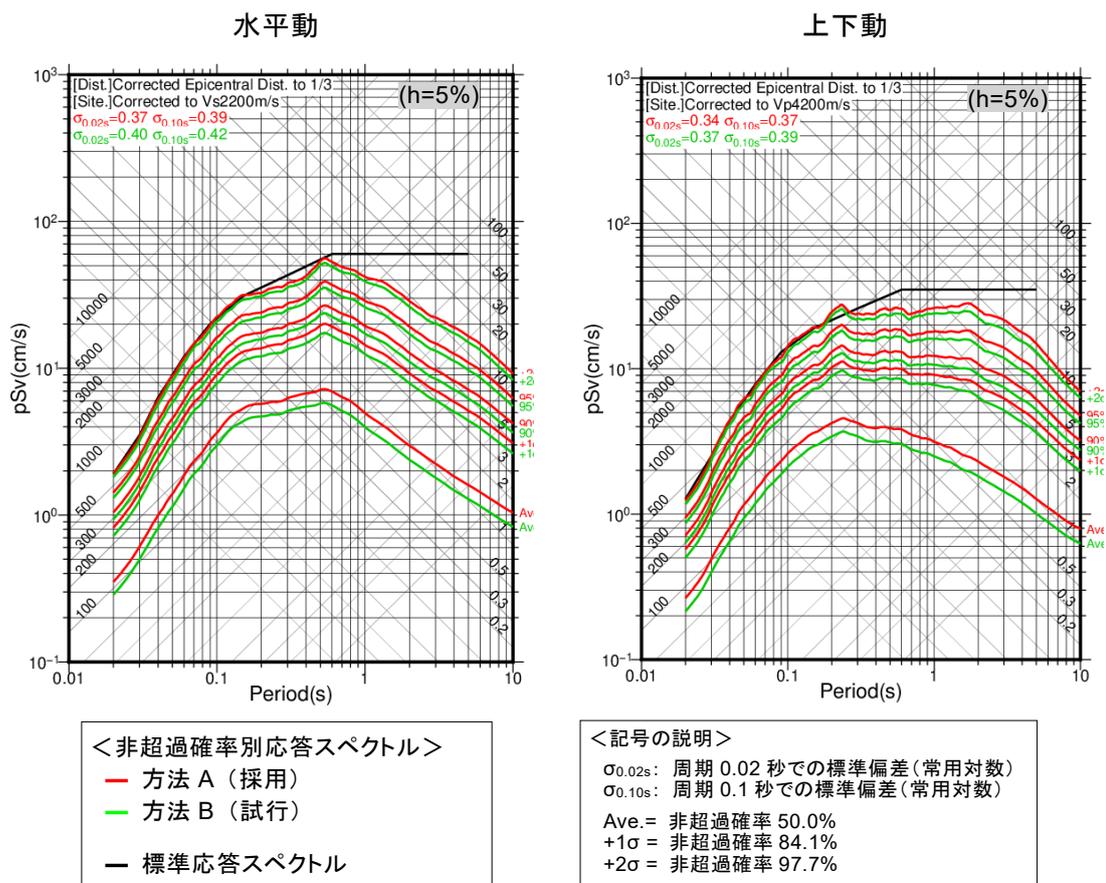
付図 1.5 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 3 (G-R 則想定 of 重み付け)

Appended Figure 1.5 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 3 (weighting following the G-R law)



付図 1.6 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4a (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0) )

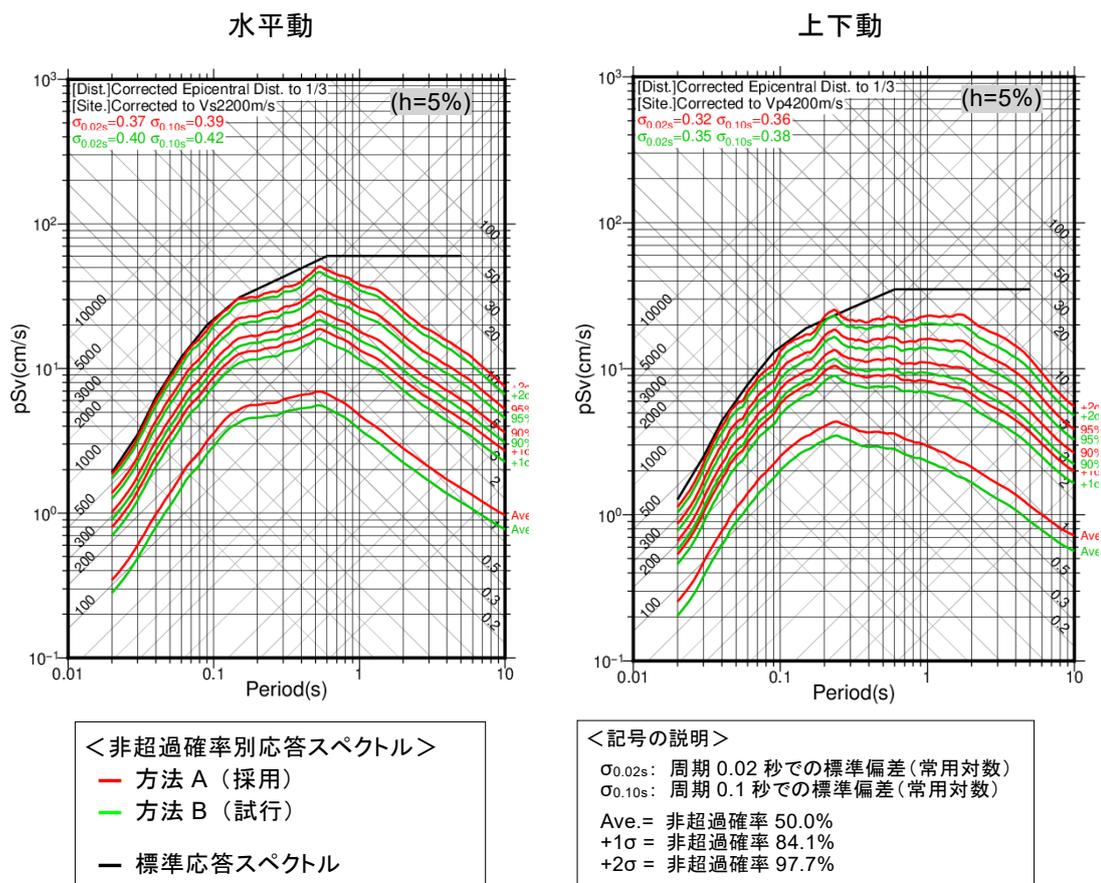
Appended Figure 1.6 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 4a (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))



付図 1.7 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 4b (特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0) )

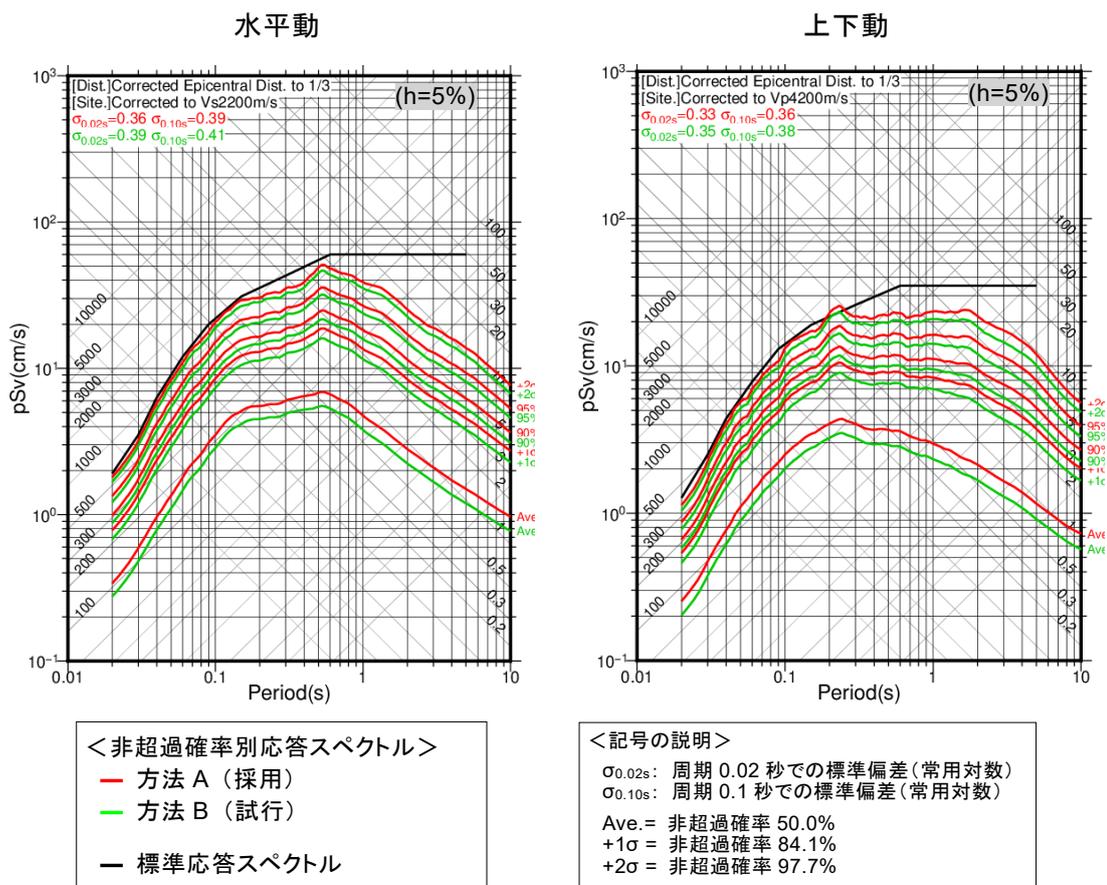
Appended Figure 1.7 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 4b (reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))





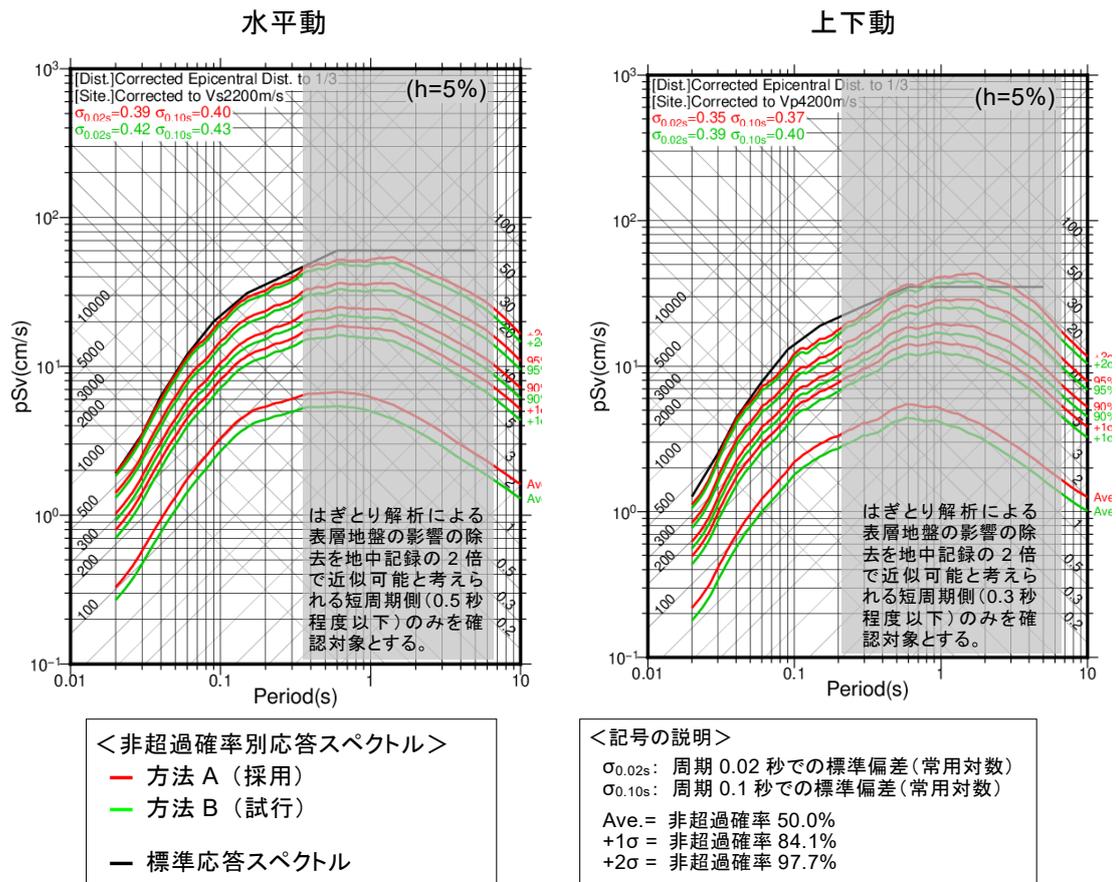
付図 1.9 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：ケース 2'a (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0.5, D=0))

Appended Figure 1.9 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 2'a (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0.5, and D=0))



付図 1.10 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：  
 ケース 2'b (Mw6.5 未満、かつ特徴的な地震動のうち人工要因による特徴を含むグループの重み低減 (Group A=1, B=1, C=0, D=0))

Appended Figure 1.10 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 2'b (Mw < 6.5 and reduction of weight for groups containing features due to artificial factors among characteristic ground motions (Group A=1, B=1, C=0, and D=0))



付図 1.11 震源距離補正の方法を変えた場合の非超過確率別応答スペクトルの比較：  
ケース 4' (地中観測記録の 2 倍)

Appended Figure 1.11 Comparison of response spectra for each non-exceedance probability  
when the method of the source-station distance adjustment is changed: case 4' (twice the  
downhole records)

## 付録2 群発地震の観測記録の確認

本研究における追加解析で対象とした15地震（水平動100記録、上下動51記録）の中には、長野県・岐阜県境付近で発生している群発地震に関連する4地震（水平動26記録、上下動13記録）、並びに石川県能登地方で発生している群発地震に関連する2地震（水平動11記録<sup>(注5)</sup>、上下動6記録）が含まれる。本付録では、これらの群発地震の地震動強さを把握することを目的に、距離減衰式による推定値との比較、並びに地震規模Mw及び震源深さが同程度の他の地震のはざとり波との比較を行った。

なお、これらの地震は、5.1の地震活動タイプ（本震、余震、前震）のラベル付けにおいて、「群発地震（本震）」と表記し、統計処理のグループとしては「本震」に分類した。なお、従来研究においては「群発地震（本震）」に分類された地震はなかった。

### (1) 長野県・岐阜県境付近の群発地震

解析対象とした長野県・岐阜県境付近の群発地震の震央分布を付図2.1に示し、それらの地震と観測記録の諸元一覧を付表2.1に示す。Mw5.1の3地震及びMw5.2の1地震の計4地震であり、震源深さはいずれも数km程度と浅い。

#### ① 地表観測記録と距離減衰式による推定値の比較

当該群発地震の地震動の大きさを確認するために、水平動を対象に、地表観測記録と既往の距離減衰式<sup>21</sup>による推定値の応答スペクトルの大きさを比較した（付図2.2～付図2.5）。地表観測記録は距離減衰式による推定値と同等又は小さい傾向がある。

なお、本研究の統計処理では、はざとり波を使用しているが、はざとり解析精度の影響を含むこと、観測地盤条件（Vs、Vp）によって距離減衰式の適用範囲の制約があることから、ここでは地表観測記録との比較を行うこととした。

#### ② 地震規模・震源深さが同程度の地震のはざとり波との比較

統計処理で用いたはざとり波（震源距離及び地盤物性の補正後）について、長野県・岐阜県境付近の群発地震、及び地震規模・震源深さが同程度のその他の地震（Mw5.1及び5.2、震源深さ5km未満）のはざとり波の擬似速度応答スペクトル（減衰定数5%）を比較した結果を付図2.6に示す。当該群発地震の応答スペクトル（桃色線）は、その他の地震の応答スペクトル（水色線）のばらつきの範囲内に収まっているが、相対的には小さい傾向がある。また、それぞれの地震のはざとり波の平均スペクトル（対数平均）を比較すると、全周期で群発地震（赤線）の方が小さい傾向があることが分かった。しかしながら、全データの統計処理結果（黒線）と群発地震を除いた場合の統計処理結果（橙色線）を比較した場合には、後者の方がわずかに大きくなるものの顕著な差異はないことを確認した。

(注5) 2.における観測記録の品質確認の結果、2022年6月19日石川県能登地方の地震のKiK-net珠洲(ISKH01)における観測記録のEW成分(1記録)は解析対象外とした。

## (2) 石川県能登地方の群発地震

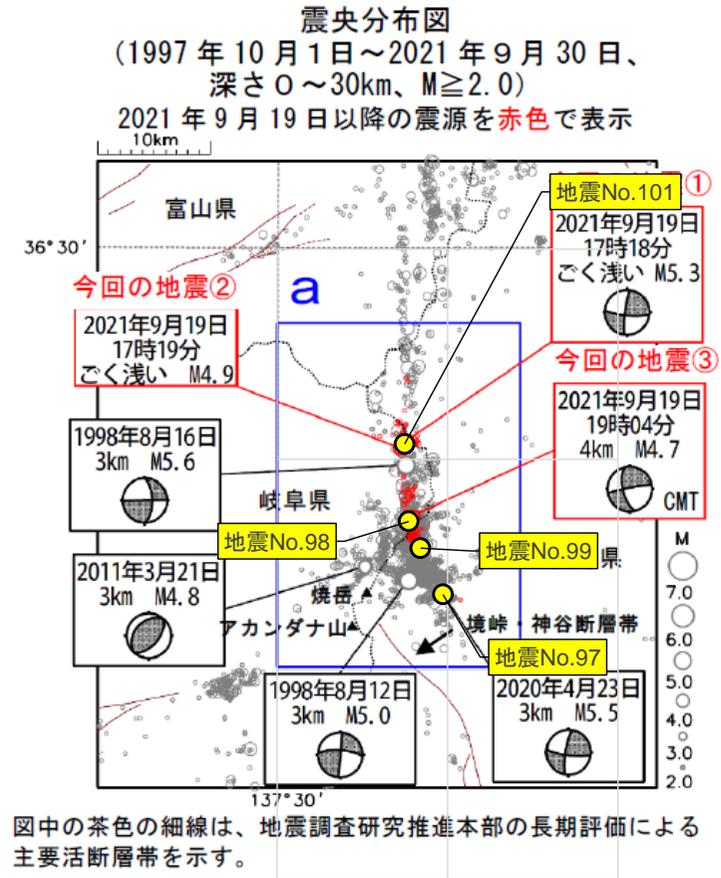
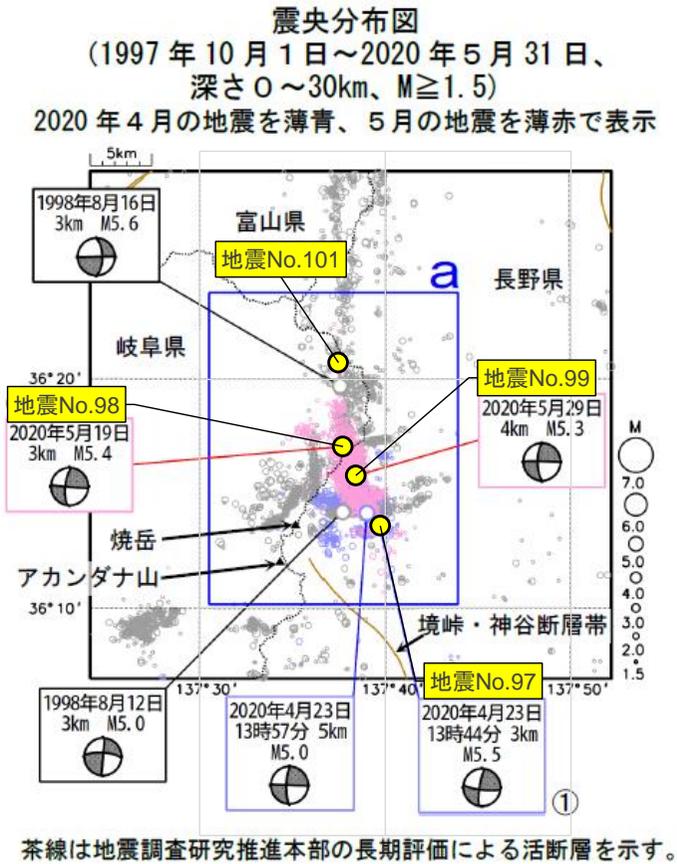
解析対象とした石川県能登地方の群発地震の震央分布を付図 2.7 に示し、それらの地震と観測記録の諸元一覧を付表 2.2 に示す。Mw5.0 と Mw5.2 の 2 地震であり、震源深さはいずれも 13 km 程度である。

### ① 地表観測記録と距離減衰式による推定値の比較

当該群発地震の地震動の大きさを確認するために、水平動を対象に、上記(1)と同様に地表観測記録と既往の距離減衰式<sup>21</sup>による推定値の応答スペクトルの大きさを比較した（付図 2.8 及び付図 2.9）。地表観測記録は距離減衰式による推定値と同等又は大きい傾向がある。

### ② 地震規模・震源深さが同程度の地震のはざとり波との比較

統計処理で用いたはざとり波（震源距離及び地盤物性の補正後）について、上記(1)と同様に、石川県能登地方の群発地震、及び地震規模・震源深さが同程度のその他の地震（Mw5.0~5.2、震源深さ 10~15 km）のはざとり波の擬似速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を比較した結果を付図 2.10 に示す。当該群発地震の応答スペクトル（桃色線）は、その他の地震の応答スペクトル（水色線）のばらつきの範囲内に収まっているが、相対的には大きい傾向がある。また、それぞれの地震のはざとり波の平均スペクトル（対数平均）を比較すると、全周期で群発地震（赤線）の方が大きい傾向があることが分かった。さらに、全データの統計処理結果（黒線）と群発地震を除いた場合の統計処理結果（橙色線）を比較すると、後者の方がわずかに小さくなるものの顕著な差異はないことを確認した。



出典) 気象庁の地震・火山月報(防災編)<sup>24</sup>に加筆

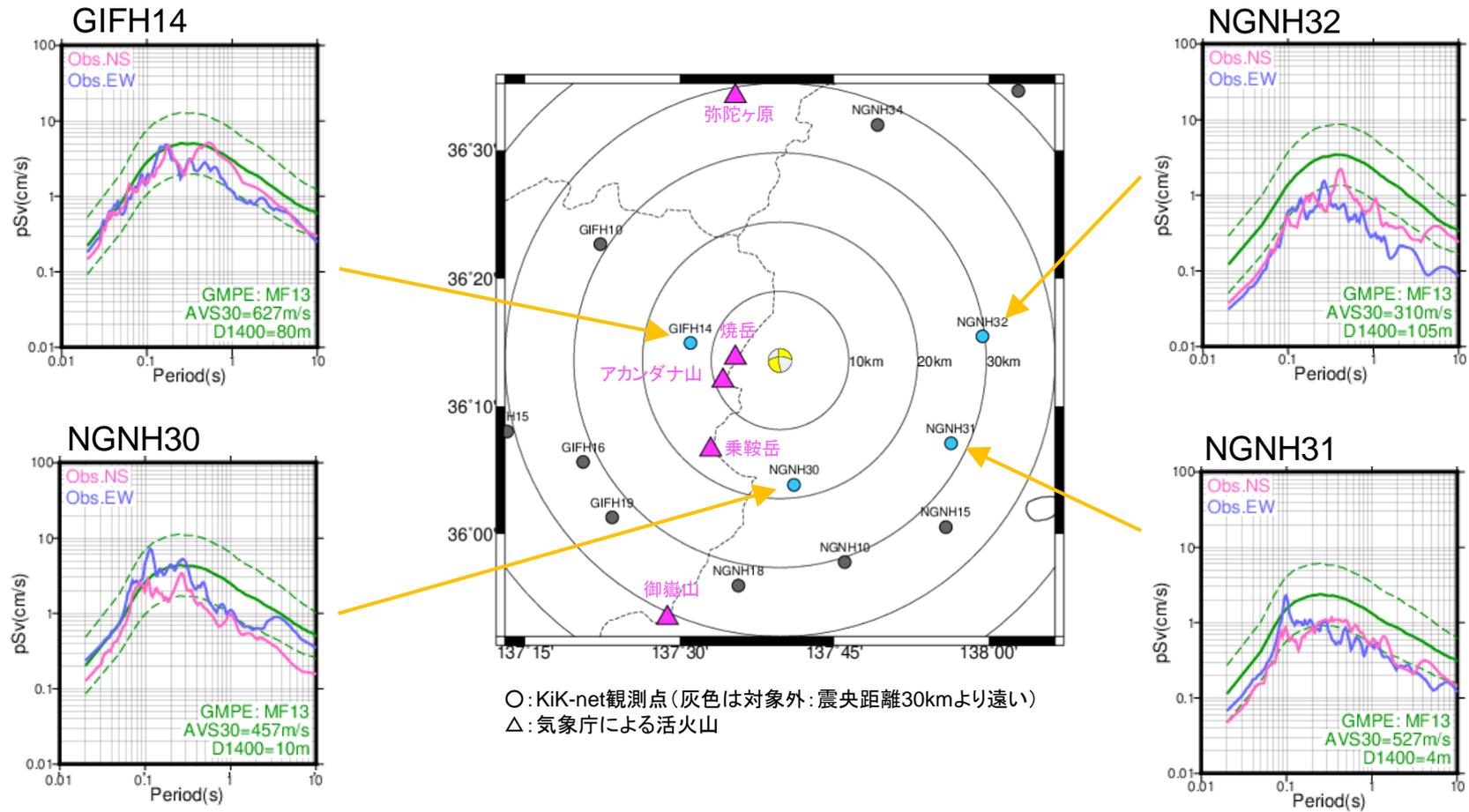
付図 2.1 解析対象とした長野県・岐阜県境付近の群発地震の震央分布

Appended Figure 2.1 Epicenter distribution of earthquake swarms around the border between Nagano and Gifu prefectures targeted for analysis

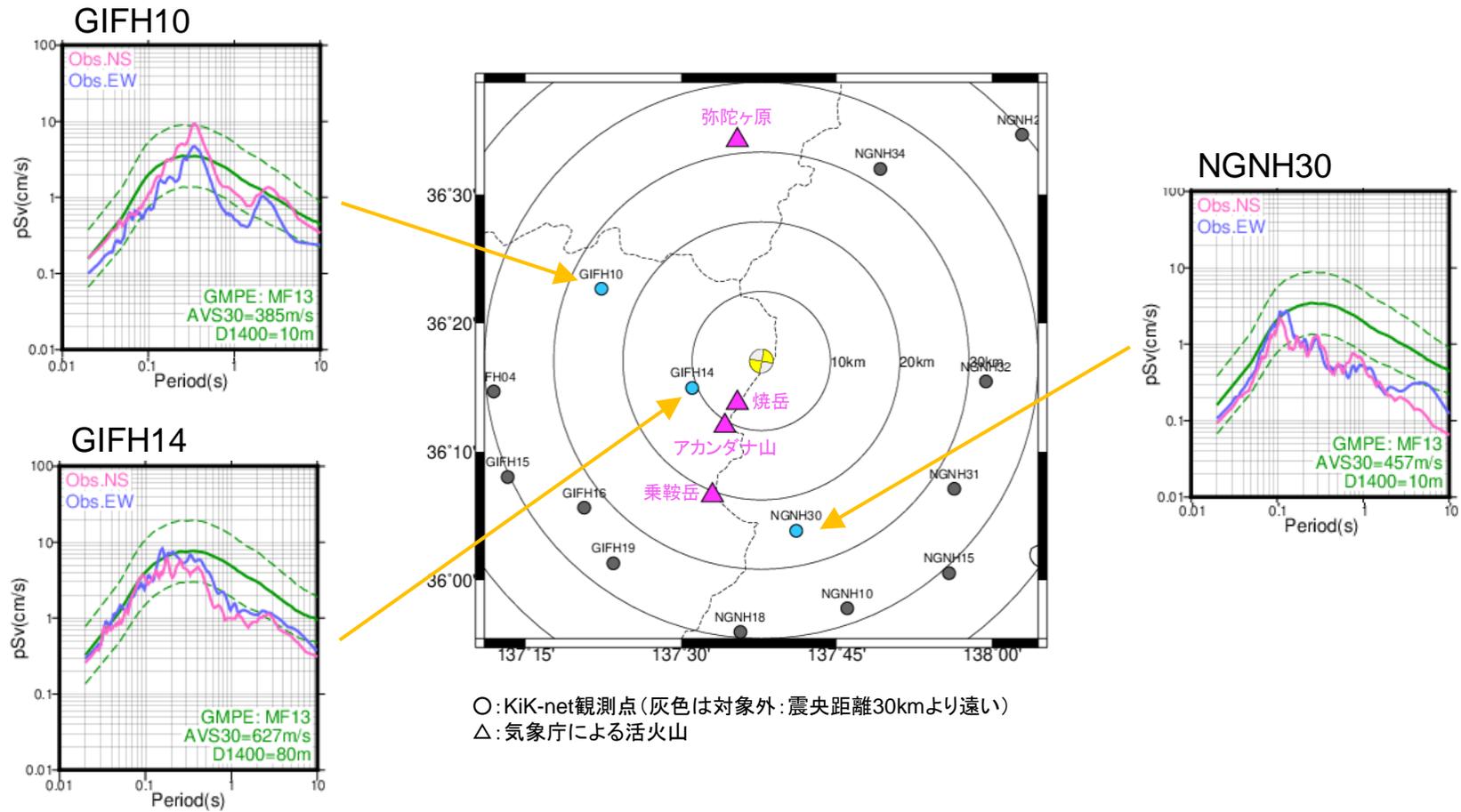
付表 2.1 解析対象とした長野県・岐阜県境付近の群発地震及び観測記録の諸元一覧

Appended Table 2.1 List of earthquake swarms around the border between Nagano and Gifu prefectures targeted for analysis and their ground-motion records

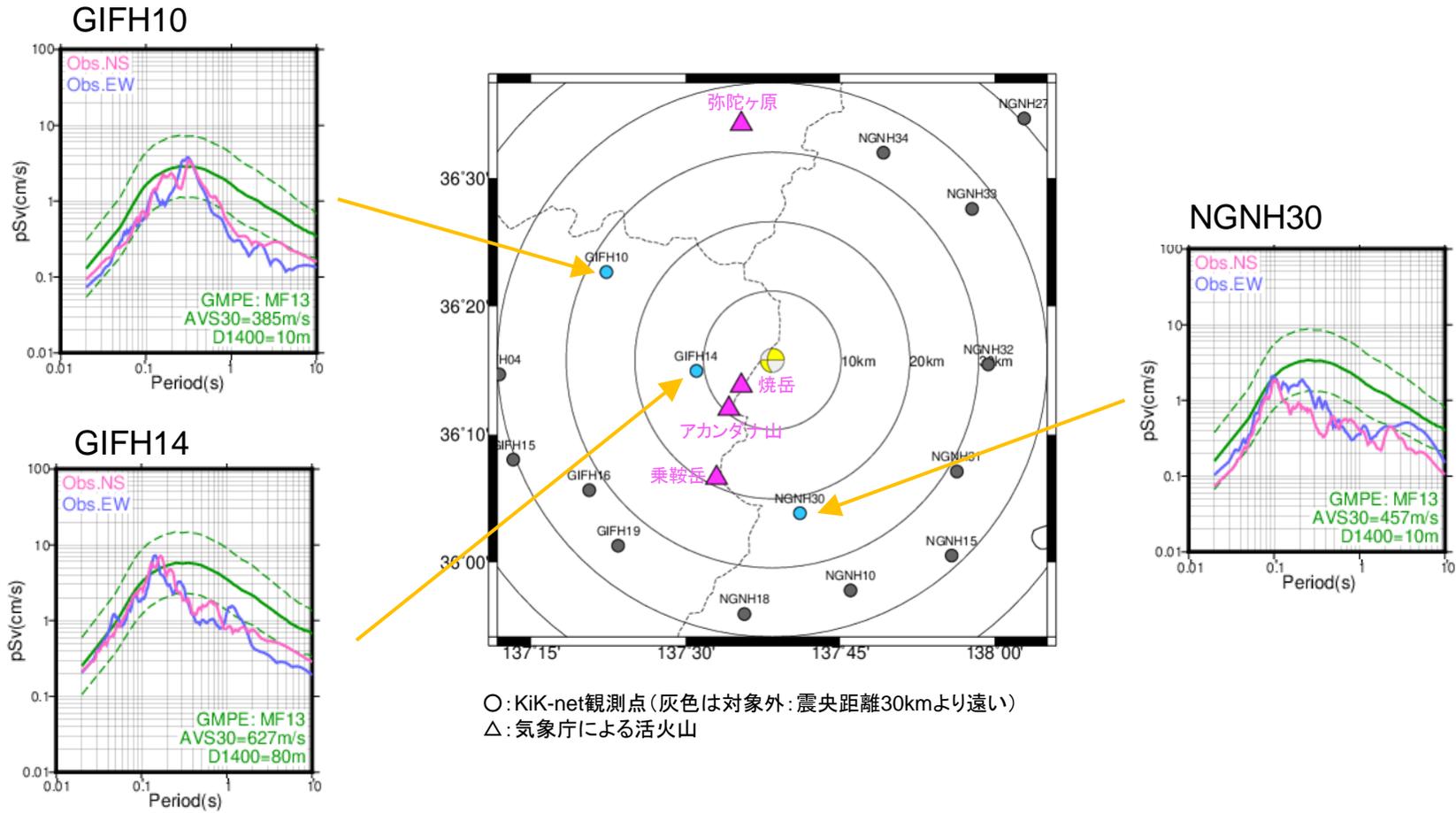
地震 No.	震央地名	発生時刻	震源深さ (km)	Mw	観測点 コード	観測点名	震央距離 (km)	断層最短 距離(km)	地震計 深度(m)	地震計 Vs(m/s)	地震計 Vp(m/s)
97	長野・岐阜県境付近	2020/04/23-13:44	2.7	5.1	GIFH14	上宝	13	13	100	2700	5100
					NGNH30	奈川	18	16	101	1000	3000
					NGNH31	塩尻	28	26	218	1100	2500
					NGNH32	松本	30	29	100	1340	3090
98	長野・岐阜県境付近	2020/05/19-13:12	2.5	5.2	GIFH14	上宝	11	10	100	2700	5100
					NGNH30	奈川	25	23	101	1000	3000
					GIFH10	神岡	25	25	100	2940	5940
99	長野・岐阜県境付近	2020/05/29-19:05	3.7	5.1	GIFH14	上宝	11	11	100	2700	5100
					NGNH30	奈川	22	21	101	1000	3000
					GIFH10	神岡	27	26	100	2940	5940
101	岐阜県飛騨地方	2021/09/19-17:18	0.0	5.1	GIFH14	上宝	14	12	100	2700	5100
					GIFH10	神岡	23	22	100	2940	5940
					NGNH34	大町中	27	26	106	970	3100



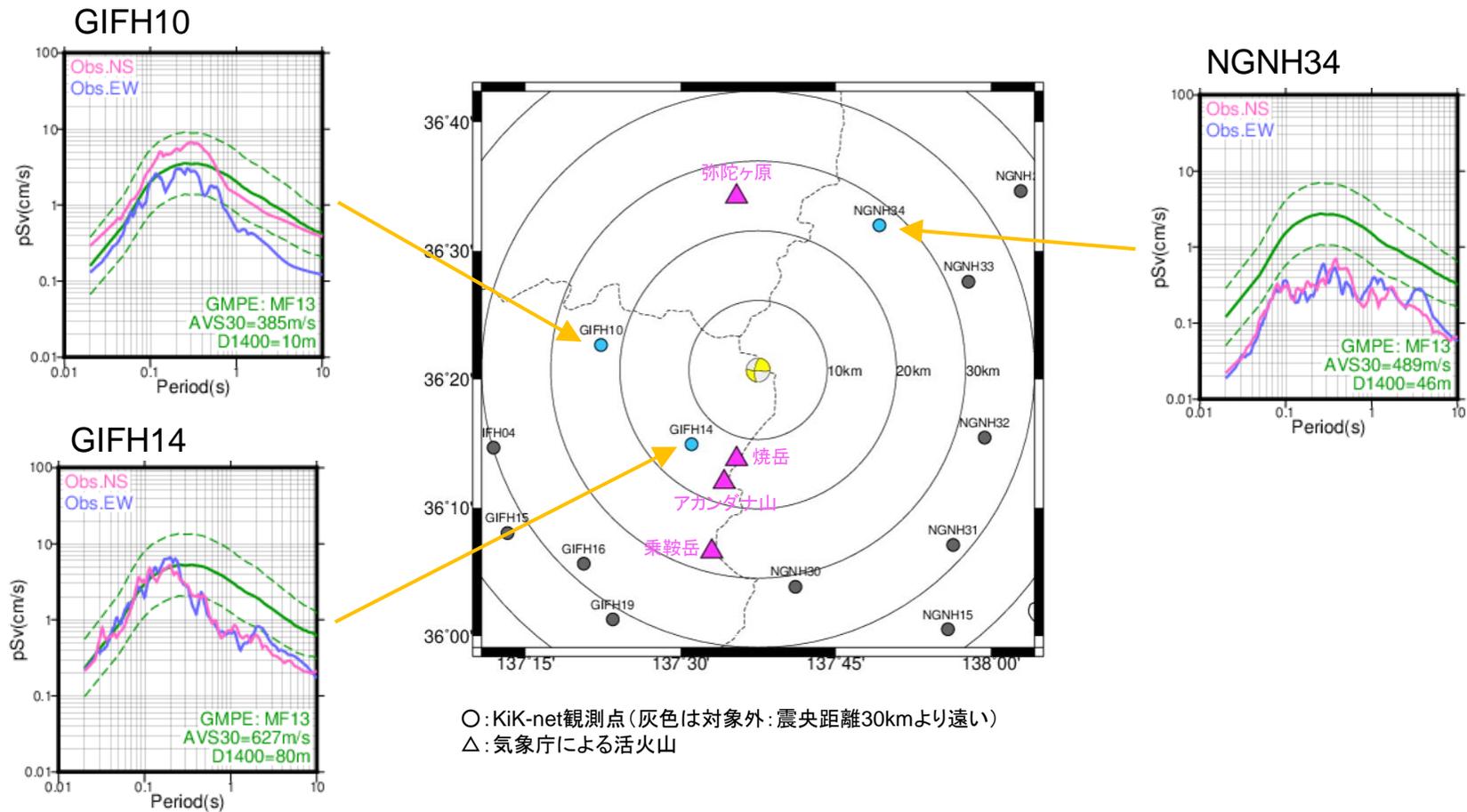
付図 2.2 群発地震 (2020年4月23日 長野・岐阜県境付近の地震: No. 97、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較  
 Appended Figure 2.2 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred around the border between Nagano and Gifu prefectures on April 23, 2020: No. 97; Mw5.1) and estimated values by the ground-motion model



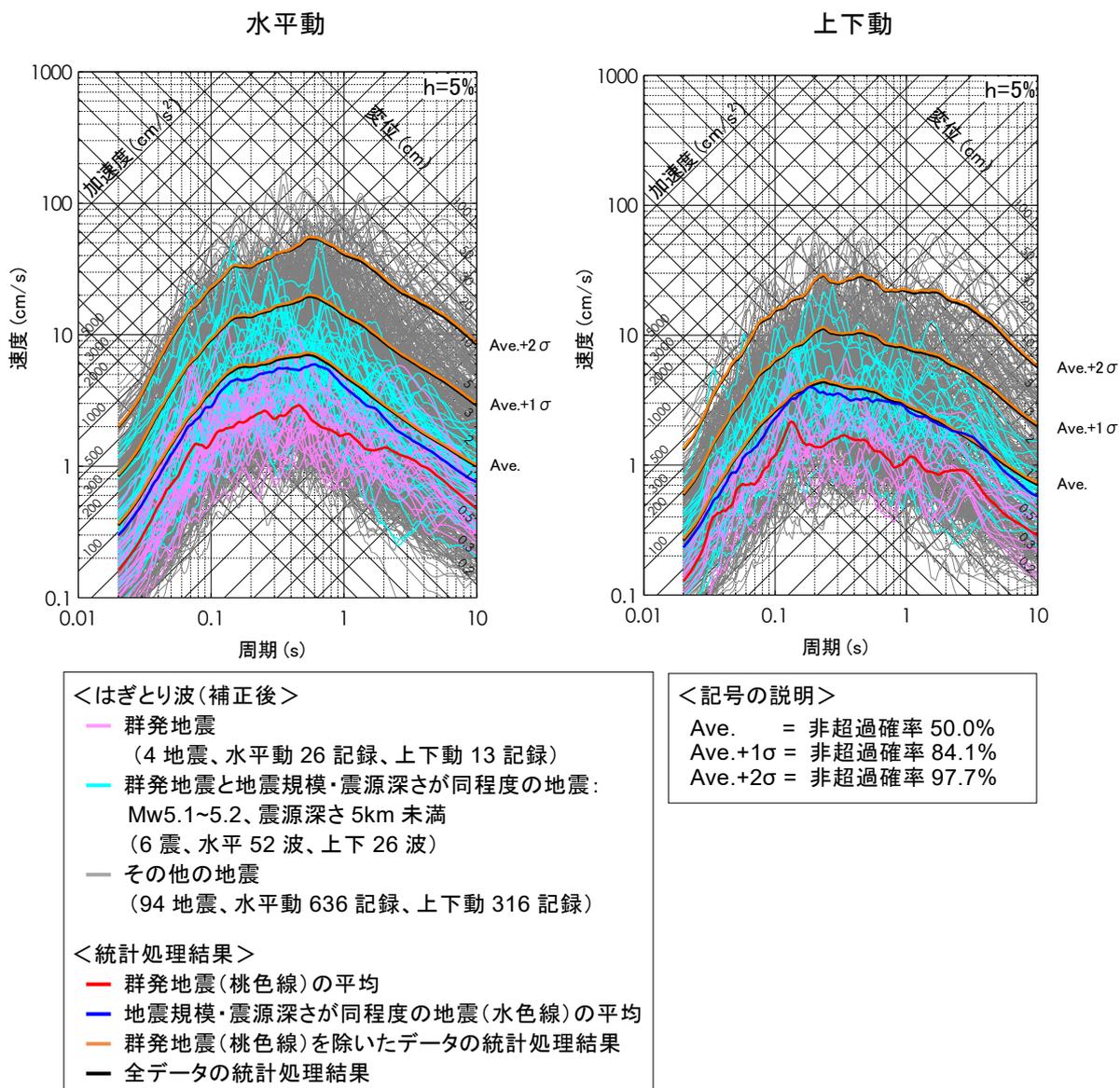
付図 2.3 群発地震 (2020年5月19日 長野・岐阜県境付近の地震: No. 98、Mw5.2) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較  
 Appended Figure 2.3 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred around the border between Nagano and Gifu prefectures on May 19, 2020: No. 98; Mw5.2) and estimated values by the ground-motion model



付図 2.4 群発地震 (2020年5月29日 長野・岐阜県境付近の地震: No. 99、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較  
 Appended Figure 2.4 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred around the border between Nagano and Gifu prefectures on May 29, 2020: No. 99; Mw5.1) and estimated values by the ground-motion model



付図 2.5 群発地震 (2021年9月19日 長岐県飛騨地方: No. 101、Mw5.1) の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較  
 Appended Figure 2.5 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred in Hida region, Gifu prefecture on September 23, 2021: No. 101; Mw5.1) and estimated values by the ground motion-model



付図 2.6 長野県・岐阜県境付近の群発地震及びその他の地震のはぎとり波の応答スペクトルの比較

Appended Figure 2.6 Comparison between response spectra of outcropping motions of the earthquake swarms around the border between Nagano and Gifu prefectures and other earthquakes

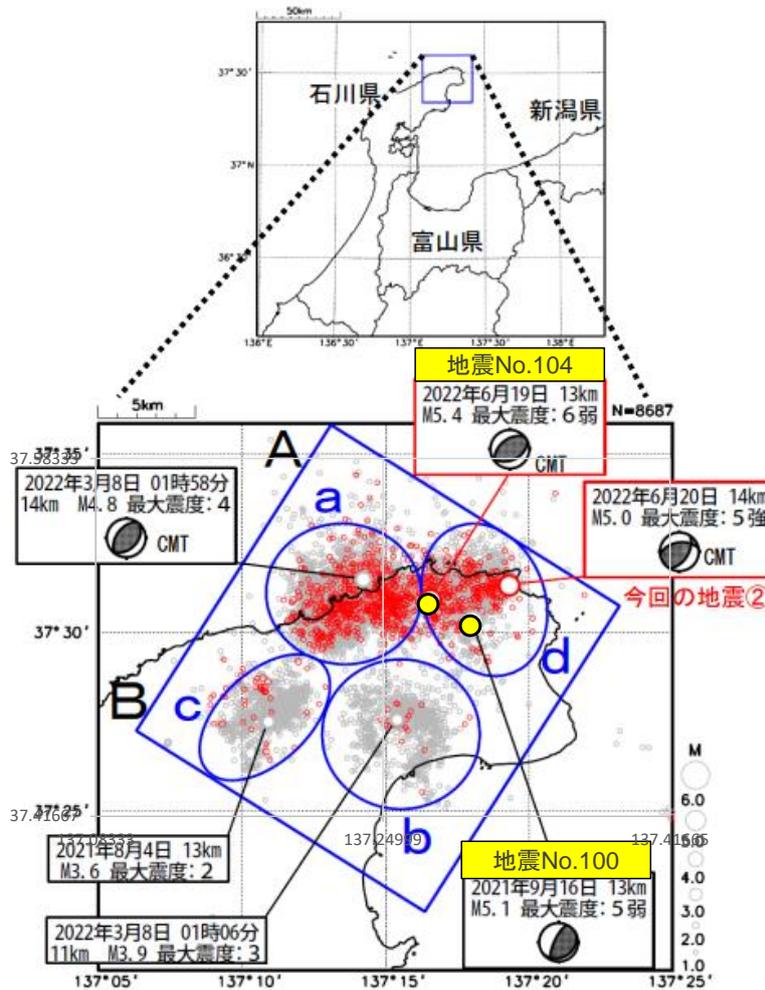


図 2-1 震央分布図

(2020年12月1日～2022年6月30日、  
深さ0～25km、 $M \geq 1.0$ )

黒色の吹き出しは領域 a～d の各領域内で  
最大規模の地震及び最大震度 5 弱以上の地震  
2022年6月の地震を赤色で表示

出典) 気象庁の地震・火山月報 (防災編) <sup>24</sup> に加筆

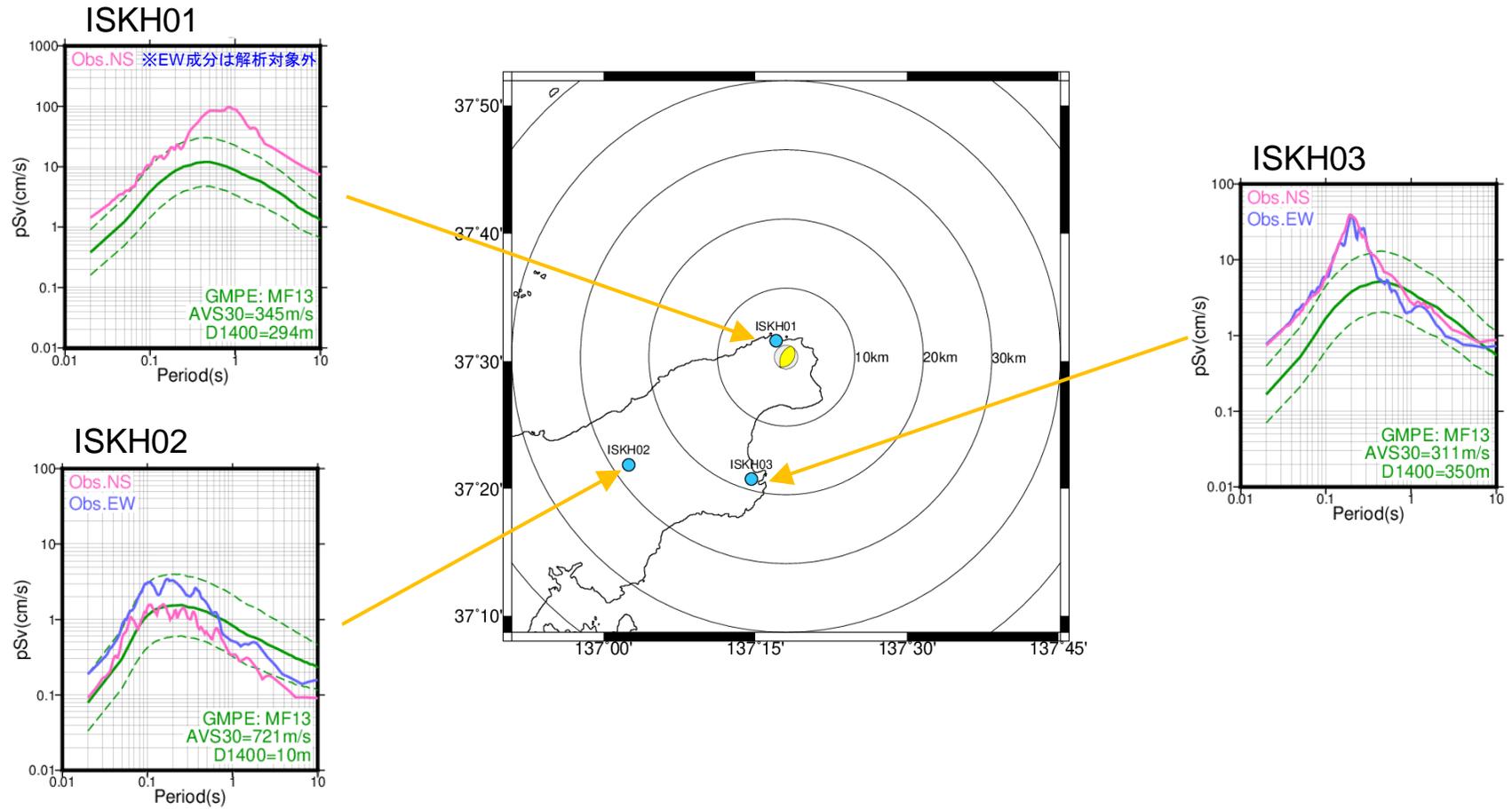
付図 2.7 解析対象とした石川県能登地方の群発地震の震央分布

Appended Figure 2.7 Epicenter distribution of earthquake swarms in Noto region, Ishikawa  
prefecture targeted for analysis

付表 2.2 解析対象とした石川県能登地方の群発地震及び観測記録の諸元一覧

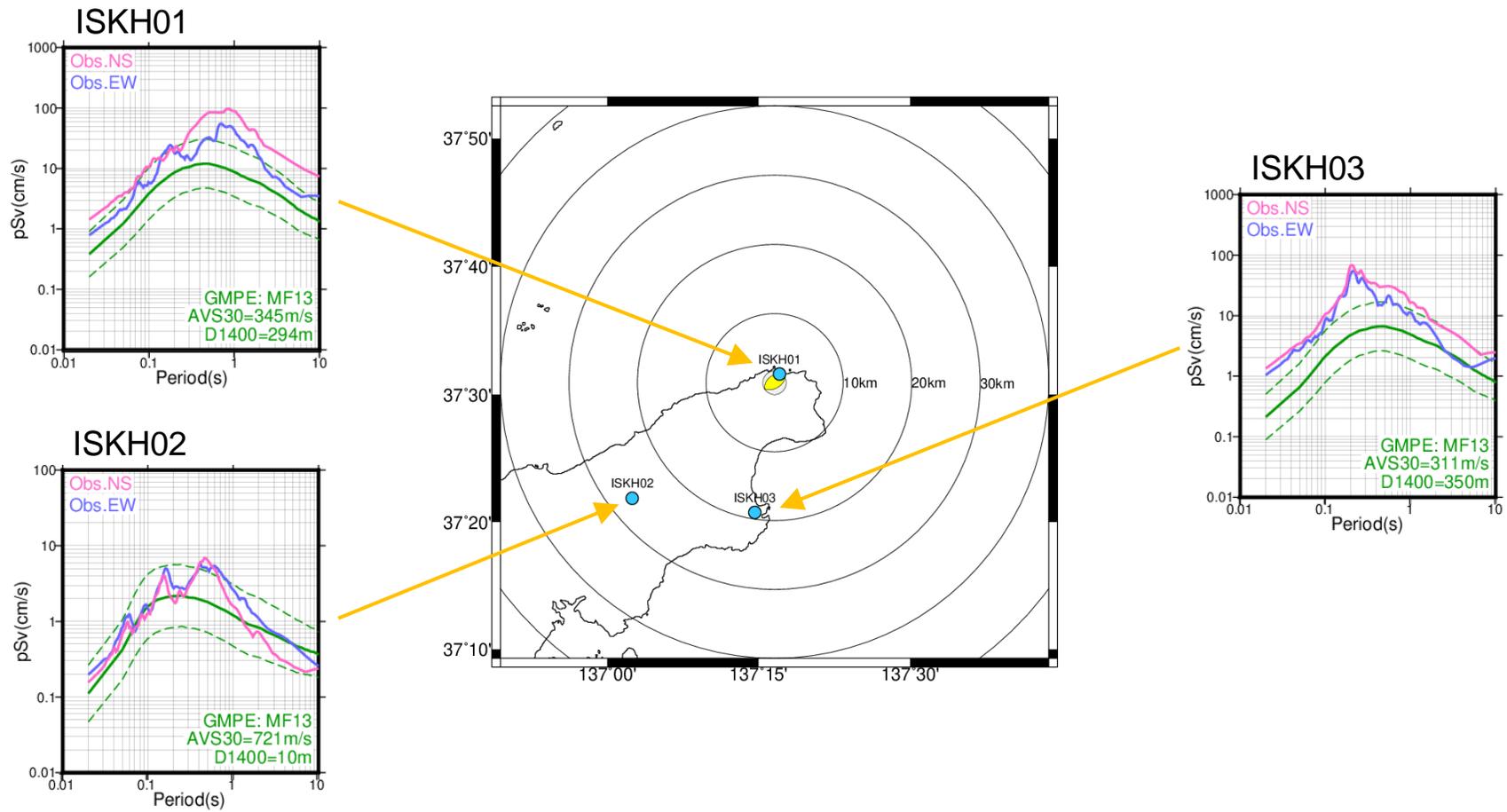
Appended Table 2.2 Specifications of earthquake swarms in Noto region, Ishikawa prefecture targeted for analysis and their ground-motion records

地震 No.	震央地名	発生時刻	震源深さ (km)	Mw	観測点 コード	観測点名	震央距離 (km)	断層最短 距離(km)	地震計 深度(m)	地震計 Vs(m/s)	地震計 Vp(m/s)
100	石川県能登地方	2021/09/16-18:42	13.1	5.0	ISKH01	珠洲	3	12	200	630	1970
					ISKH03	内浦	18	13	207	870	2180
					ISKH02	柳田	28	14	102	530	2050
104	石川県能登地方	2022/06/19-15:08	13.1	5.2	ISKH01	珠洲	1	11	200	630	1970
					ISKH03	内浦	19	13	207	870	2180
					ISKH02	柳田	27	14	102	530	2050



付図 2.8 群発地震（2021年9月16日石川県能登地方の地震：No.100、Mw5.0）の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較

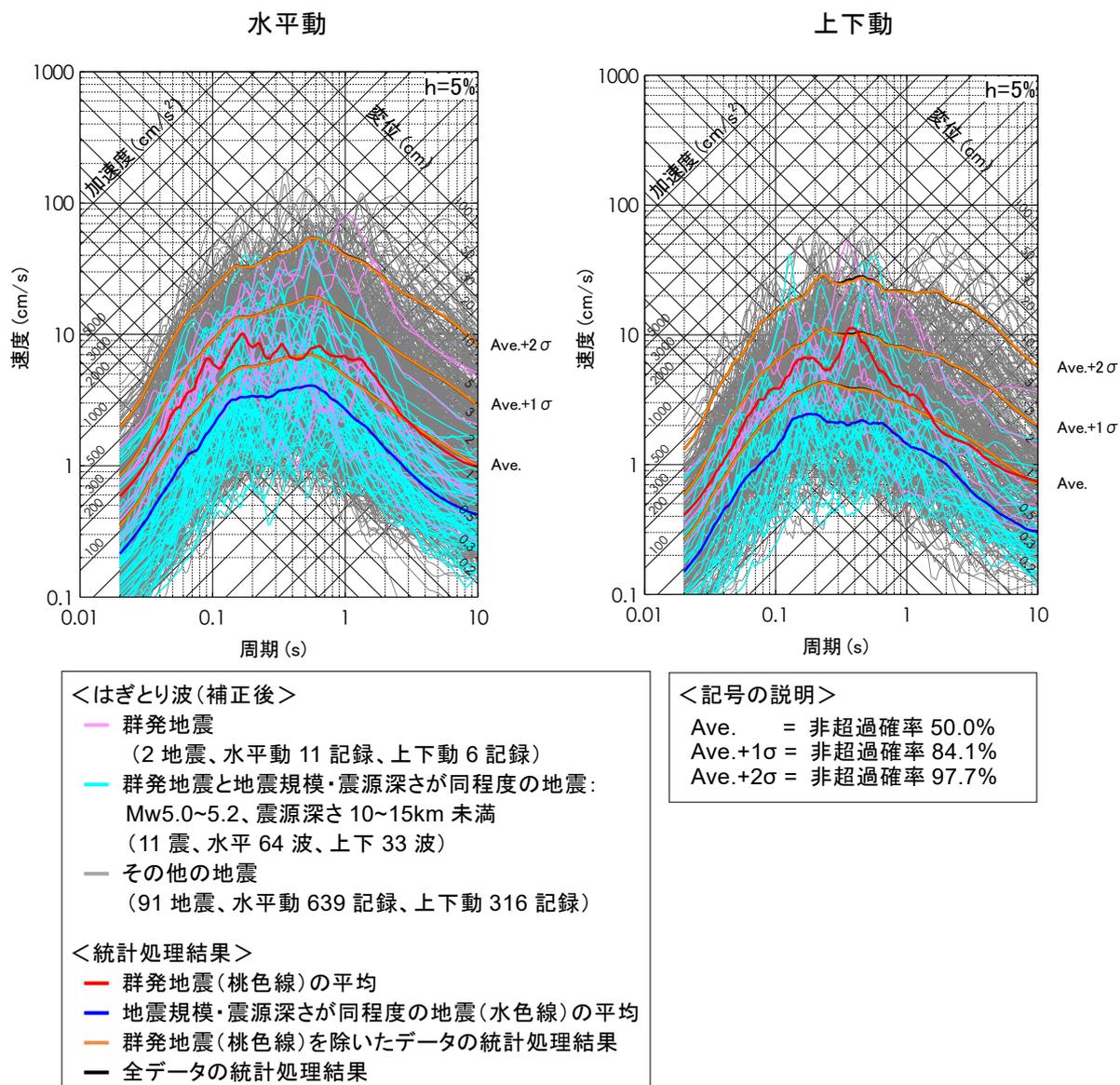
Appended Figure 2.8 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred in Noto region, Ishikawa prefecture on September 16, 2021: No. 100; Mw5.0) and estimated values by the ground-motion model



付図 2.9 群発地震（2022年6月19日石川県能登地方の地震：No. 104、Mw5.2）の地表観測記録及び距離減衰式による推定値の比較

Appended Figure 2.9 Comparison between ground motion records of an earthquake swarm (an earthquake occurred in Noto region, Ishikawa prefecture on June 19, 2022:

No. 104; Mw5.2) and estimated values by the ground-motion mode



付図 2.10 石川県能登地方の群発地震及びその他の地震のはぎとり波の応答スペクトルの比較

Appended Figure 2.10 Comparison between response spectra of outcropping motions of the earthquake swarms in Noto region, Ishikawa prefecture and other earthquakes