



Title	地震観測記録に基づく地表/地中スペクトル比の方位依存性と変動特性に関する研究
Author(s)	青木, 雅嗣
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16852号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16852
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99697
Type	doctoral thesis
File Information	Masashi_Aoki.pdf, 全文



地震観測記録に基づく地表/地中スペクトル比の
方位依存性と変動特性に関する研究

Characterization of Azimuthal Dependence and Variability in Surface-to-Borehole
Spectral Ratios Based on Seismic Observation Records

2025 年度

北海道大学大学院工学院 建築都市空間デザイン専攻
都市防災学研究室

青木 雅嗣

論文要旨

高い信頼性を有する耐震設計を実施し、想定される地震リスクを適正に評価するためには、建設地点のサイト特性を正確に評価し、将来の地震動を精度よく予測することが不可欠である。現在、実務において広く用いられている 1 次元重複反射理論は、地盤を水平成層構造と仮定する簡便な手法であるが、不整形地盤を有する地点においては、観測記録との間に無視できない乖離が生じることが知られている。従来、このばらつきの多くは偶然的ばらつきとして統計的に処理され、方位成分を平均化することで評価されてきた。しかし、この平均化は、特定の到来方位に対して顕著に現れる物理的なサイト特性を埋没させ、地震ハザード評価における認識論的不確実性を残存させる要因となっている。本研究では、全国の基盤強震観測網 (KiK-net) で得られた膨大な地震観測記録を対象に、地表/地中スペクトル比 (SBSR) の方位依存性を体系的に分析し、観測される変動特性を系統的ばらつきと偶然的ばらつきに分離・評価するとともに、実務に資する簡易評価手法を提案することを目的とする。本論文は全 7 章で構成され、以下に各章の概要を示す。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的について述べる。地震工学におけるサイト特性評価の重要性と、従来の 1 次元理論およびエルゴード的仮定に基づく評価手法の限界を整理した。特に、観測記録に見られるばらつきの中に、方位依存性という系統的な特性が含まれている可能性を指摘し、これを解明することが地震動評価の高度化に寄与することを示した。

第 2 章「地震観測記録のデータベースと地表/地中スペクトル比の方位依存性」では、まず本研究で使用する KiK-net の観測記録の選定基準と解析手法について述べた。その上で、不整形地盤を有する特定の観測点 (KiK-net 銚子中観測点) を代表事例として取り上げ、到来方向別の観測 SBSR に見られる大きな変動を示すことで、1 次元評価の限界を実証的に示した。さらに、全観測点を対象とした網羅的な統計分析を行い、SBSR のピーク周波数や振幅が地震波の到来方位によって有意に変動すること、およびその方位依存性が多くの観測点で普遍的に見られる現象であることを明らかにした。

第 3 章「二重スペクトル比法に基づく変動要因の検証」では、二重スペクトル比法に基づいて、SBSR の変動に含まれる震源・伝播経路特性の影響を除去し、サイト近傍の地盤構造等の条件に起因する変動成分を抽出する手法について論じた。この手法により、SBSR のばらつきが、大局的要因によるものか、局所的要因によるものかを明確に区別し、方位依存性がサイト固有の物理現象であることを裏付けた。

第 4 章「サイト特性における不確実性の整理と不整形地盤サイトにおける物理的検証」では、サイト特性に含まれる認識論的不確実性 (モデル化可能な変動) と偶然的ばらつき (真のランダム成分) の整理を行い、不整形地盤における評価精度の限界について論じた。不整形地盤を有する観測点を模した地盤モデルを対象に、2 次元有限要素法 (FEM) を用いた数値シミュレーションを実施した。観測された系統的な変動が、地下の不整形構造による散乱現象等で定性的に再現可能であることを実証した。

第 5 章「地表/地中スペクトル比における偶然的ばらつきと系統的ばらつきの分離」では、観測された SBSR の変動構造を統計的に解明するための枠組みを提示した。分散分析等の統計手法を用い、総変動を地震ごとにランダムに生じる偶然的ばらつきと、サイト固有の条件に起因して再現性をもって現れる系統的ばらつきに分離した。これにより、従来の手法では評価しきれなかった系統的な変動成分の定量的評価を行った。

第 6 章「変動要因の感度解析と簡易評価手法の提案」では、第 5 章で評価した偶然的ばらつきと系統的ばらつきの簡易予測手法を提示した。偶然的ばらつきの周波数特性は、地盤の卓越周波数で正規化することでサイトに依らない共通した形状を示したことから、卓越周波数による予測式を構築した。また、機械学習モデリングを用いた感度解析を実施し、地形・地質情報や S 波速度構造等の物理パラメータが、

SBSR の系統的ばらつきにどの程度寄与しているかを分析した。高感度パラメータ群の水準の組み合わせにより観測点を 27 グループに分類し、各グループにおける系統的ばらつきの代表値を算出することで、詳細な地盤調査を実施せずとも、地形情報等からサイト特性の変動幅を推定可能な簡易評価手法を提案した。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた知見を総括した。SBSR の方位依存性を考慮し、提案した簡易評価手法を用いることで、従来の平均的な評価手法に比べてサイト増幅特性の予測精度が向上することを確認し、今後の非エルゴード的地震ハザード評価への実装に向けた展望をまとめた。

関連発表論文等

【査読付き論文】

- 1) 青木 雅嗣, 山本 優, 内山 泰生, 高井 伸雄: 方位別に算出する地表/地中スペクトル比の変動に関する討—KiK-net 銚子中観測点における事例—, 日本地震工学会論文集, 25 巻, 1 号, p. 1_13-1_24, 2025. https://doi.org/10.5610/jaee.25.1_13

【発表】

- 2) 青木 雅嗣, 山本 優, 内山 泰生: 観測伝達関数の方位による差異の要因に関する検討, 日本建築学会学術講演会, p. 125-126, 2022.
- 3) 青木 雅嗣, 山本 優, 内山 泰生, 高井 伸雄: 方位別に算出する地表/地中スペクトル比と地震波到来方向の相関に関する検討 S 波部およびコーダ部を対象とした比較検討, 日本建築学会学術講演会, p. 797-798, 2023.
- 4) 青木 雅嗣, 山本 優, 内山 泰生, 高井 伸雄: 方位別に算出する地表/地中スペクトル比と地震波到来方向の相関に関する検討, 第 16 回日本地震工学シンポジウム論文集, Day2-C1-PA01, 2023.
- 5) 青木 雅嗣, 山本 優, 徳光 亮一, 内山 泰生, 高井 伸雄: 局所的な不整形地盤に起因する地表/地中スペクトル比の変動に関する検討, 日本建築学会学術講演会, p. 109-110, 2024.
- 6) 青木 雅嗣, 山本 優, 徳光 亮一, 内山 泰生, 高井 伸雄: 地表/地中スペクトル比の地震波到来方向による変動に関する検討, 日本建築学会学術講演会, p. 353-354, 2025.
- 7) 青木 雅嗣, 山本 優, 徳光 亮一, 内山 泰生, 高井 伸雄: KiK-net データを用いた SBSR の地震間変動における系統的・偶然的ばらつきの分離, 日本地震工学会年次大会, 2025.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	サイト特性評価に関する研究動向と課題	3
1.3	本研究の目的と構成	5
	第 1 章の参考文献	8
第 2 章	地震観測記録のデータベースと地表/地中スペクトル比の方位依存性	11
2.1	概要	11
2.2	Transverse 成分に基づく全 KiK-net 観測点の SBSR 変動評価	11
2.2.1	解析対象観測点および地震記録の選定	12
2.2.2	データ処理およびばらつきの定量評価	14
2.2.3	物理パラメータとばらつきの関係	16
2.3	特定観測点における方位依存性の事例	19
2.3.1	KiK-net 銚子中観測点の選定理由	19
2.3.2	座標回転処理による最大/最小振幅比の評価	21
2.3.3	入射場に関するパラメータと最大/最小振幅比の関係の分析	23
2.3.4	直達 S 波とコーダ波の比較	28
2.3.5	SBSR の方位依存性	29
2.4	全 KiK-net 観測点を対象とした方位依存性の統計的検証	32
2.4.1	SBSR の 1 次ピークの抽出と変動解析	32
2.4.2	MANOVA による変動要因の影響度評価	32
2.5	まとめ	35
	第 2 章の参考文献	36
第 3 章	二重スペクトル比法に基づく変動要因の検証	38
3.1	概要	38
3.2	分析手法	38
3.2.1	二重スペクトル比法の理論的背景	38
3.2.2	二重スペクトル比法に基づく SBSR ばらつきの分離手法	40
3.2.3	TSR および SBSR 変動の相関分析	43
3.3	大局的効果と局所的効果の相関分析結果	44
3.4	まとめ	49
	第 3 章の参考文献	50

第4章	サイト特性における不確実性の整理と不整形地盤サイトにおける物理的検証	51
4.1	概要	51
4.2	サイト特性評価における不確実性の分類と本研究の位置づけ	51
4.3	数値解析の概要と解析条件	53
4.3.1	周期的な不整形境界を有する地盤の応答特性	53
4.3.2	局所的な不整形境界を有する地盤の応答特性	54
4.3.3	不整形地盤による散乱波等の空間的影響範囲の検討	56
4.4	地形および入射角に起因する地表/地中スペクトル比の感度分析	59
4.4.1	IBRH19 観測点の周辺状況および観測記録	59
4.4.2	感度分析のための検討ケースの設定	61
4.4.3	数値解析結果と考察	62
4.5	まとめ	64
	第4章の参考文献	65
第5章	地表/地中スペクトル比における偶然的ばらつきと系統的ばらつきの分離	66
5.1	概要	66
5.2	解析対象データと処理	67
5.3	ばらつきの要因分離手法	67
5.4	解析結果と考察	69
5.4.1	ばらつきの成分分解	69
5.4.2	既往研究との比較と考察	71
5.5	まとめ	73
	第5章の参考文献	74
第6章	変動要因の感度解析と簡易評価手法の提案	75
6.1	概要	75
6.2	偶然的ばらつきの周波数特性とモデル化	75
6.2.1	卓越周波数による正規化	75
6.2.2	偶然的ばらつきの共通特性	77
6.3	機械学習を用いた系統的ばらつきの感度解析	78
6.3.1	系統的ばらつきの指標化	78
6.3.2	サイトパラメータと系統的ばらつきの単変量解析	79
6.3.3	機械学習を用いた感度解析	85
6.3.4	解析条件と使用データ	86
6.3.5	サイトパラメータの感度解析結果	88
6.4	サイトパラメータに基づく簡易評価手法の提案	90
6.4.1	パーセンタイルに基づく類型化手法	90
6.4.2	類型化されたサイト特性と系統的ばらつきの関係	91
6.5	まとめ	94
	第6章の参考文献	95
第7章	結論	96
7.1	本研究の総括	96
7.2	課題と今後の展望	97
	謝辞	98

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

地震工学の主たる目的は、将来発生しうる地震動を精度よく予測し、構造物の被害を最小限に抑えることにある。地震動の特性は、震源における断層破壊過程等から表現される震源特性、地殻内を伝播する過程での減衰や散乱から表現される伝播経路特性、そして地表近傍の堆積層によるサイト特性の積として物理的に記述される^[1-1]。このうち、サイト特性は、局所的な地盤条件によって地震動振幅を数倍から十数倍に増幅させ、極めて狭い範囲に甚大な被害を集中させる支配的な要因となることが知られている。したがって、建設地点固有のサイト特性を定量的かつ正確に評価することは、地震工学における重要課題の一つである。

長年にわたり、サイト特性の評価には地盤を水平成層構造と仮定する 1 次元重複反射理論が標準的に用いられてきた^[1-2]。この理論的枠組みの基礎は、Kanai (1950)^[1-3]により確立された重複反射理論や、Thomson (1950)^[1-4]および Haskell (1953)^[1-5]によって確立されたプロパゲータマトリクス法にある。多層構造を持つ弾性体中の波動伝播を、各層の特性（密度、速度、層厚）を表す行列の積として記述する手法を定式化した。これにより、任意の層構造に対する理論伝達関数（Theoretical Transfer Function; TTF）を解析的に求めることが可能となり、成層地盤における地震応答解析の物理的基盤が形成された。1970 年代に Schnabel らによって開発された SHAKE プログラム^[1-6]は、この重複反射理論に媒質の非線形性（ひずみ依存性）を考慮するための等価線形化法を組み込むことにより、工学的実装として広く普及した。この手法の確立により、地表から深さ 30m までの平均 S 波速度（AVS30）による地盤分類が各国の耐震設計基準等に導入され、現在でも地震動予測式（Ground Motion Model; GMM）のサイトを代表する指標として広く使用されている。

しかし、過去の大地震において観測された被害分布や強震動記録から、単純な 1 次元モデルでは説明できない増幅現象が実際に存在することが明らかになってきた。

例えば 1985 年 9 月 19 日に発生したミチョアカン地震（Mw8.1）では、震源から約 400km 離れたメキシコシティにおいて、極めて甚大な被害をもたらした。特に、かつてテスココ湖であった軟弱地盤では、硬質地盤と比較して周期 2 秒から 4 秒の長周期成分が増幅され、その揺れが数分間にわたって継続した。この長周期地震動は、同程度の固有周期を持つ中高層建物と共振し、選択的な倒壊を引き起こした。Bard & Bouchon (1985)^[1-7]や Kawase & Aki (1989)^[1-8]により、この現象は単なる表層地盤の増幅だけでなく、盆地端部で生成された表面波（レイリー波等）が減衰の小さい軟弱な盆地内部にトラップされ、水平方向の多重反射を繰り返すことで振幅の増大と継続時間の伸長を引き起こす盆地効果であることが明らかにされた。

盆地のような凹型構造が増幅を引き起こす一方で、凸型の地形もまた、地震動を局所的に増幅させる要因となり得る。1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震（Mj7.5）において、釧路地方気象台では 919 cm/s^2 という大加速度が記録された一方で周辺被害が軽微であった。太田(1995)^[1-9]の分析によれば、この大加速度は、台地端部（崖上）という凸型地形がもたらす 4.5～6Hz 帯域の増幅効果に加え、

地震計基礎自体が持つ約 10Hz の固有振動数が高周波成分を選択的に強調した結果であるとされる。本震時には地盤の非線形化により卓越振動数が約 5Hz へと低下したものの、これら局所的な地形・基礎特性が複合的に作用することで構造物破壊能の低い短周期パルスが見かけ上の加速度を押し上げたと解釈されている。本事例は最大加速度 (PGA) や広域的な地盤分類だけでは局所的な被害リスクを正しく評価できず、サイト周辺の地形がもたらす複雑な応答特性を考慮する必要性を強く示唆している。

直下型地震における不整形地盤構造の影響を特に印象付けたのが、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震 ($M_J7.3$) である。神戸市中心部では、震度 7 の被害が幅約 1km の狭い帯状の領域に集中する「震災の帯」が形成された。Kawase (1996)^[1-10]は、この被害集中域が六甲山地と大阪湾の境界付近に位置することに着目し、基盤から鉛直に入射する直達 S 波と盆地端部の急峻な盆地端部で生成された回折波や表面波が増幅的な干渉を起こした結果であると解釈した。その後の 3 次元シミュレーションにおいても、震源の指向性と盆地端部の 3 次元構造によるフォーカシング効果が、被害分布をよく再現していることが確認された^[1-11]。

これらの事例は、不整形地盤や複雑な地形を有する地点においては、2 次元・3 次元的な波動伝播がサイト応答を支配し、局所的に想定外の被害をもたらすことを示している。その物理的解釈を裏付けてきたのは、2 次元・3 次元地盤モデルを用いた地盤応答解析の理論的枠組みである。1970 年代には、Aki & Larner (1970)^[1-12]が不整形な境界面を持つ地盤の波動散乱を、平面波の離散化波数積分法を用いて定式化した。また、無限領域へのエネルギー逸散を扱う粘性境界^[1-13]や伝達境界^[1-14]が登場したことで、限られた範囲のモデル化が可能となり現実的な計算コストによる地盤解析が可能となった。1980 年代には、Kausel & Peek (1982)^[1-15]により、層厚を十分に薄くすることで、鉛直方向を有限要素法的な補間を、水平方向を波動関数の解析解を用いて定式化し、厳密性と柔軟性を兼ね備えた薄層法が確立された。AL 法や薄層法は、特定の幾何形状に対しては強力なツールであったが、任意の複雑な地盤構造を扱うには領域全体を離散化する有限差分法(FDM)や有限要素法(FEM)といった数値解析手法が必要不可欠であった。FDM は、FEM に比べてメモリ効率がよく、大規模計算に適していたため早期に地震動シミュレーションに適用された。Virieux^[1-16]は、空間的・時間的に半格子ずらすスタッガード格子と、速度-応力ベクトルを定式化することで、FDM の数値安定性を飛躍的に高めた。1990 年代に入ると、スーパーコンピュータの性能向上に伴い、Frankel (1993)^[1-17]や Olsen et al. (1995)^[1-18]など、大規模な 3 次元モデルによる数値解析が実現した。

地震動シミュレーション技術が発展してきたものの、いまだに構造物の対象周波数帯とのミスマッチは残る。構造物の主要な固有振動数は、10Hz 以下に集中しているが^[1-19]、地震動シミュレーションにおいて数値解析手法を用いて 10Hz 程度までをモデル化しようとする場合、地盤のかなり詳細な物性値を把握する必要がある。S 波速度が 200m/s の地盤で有効周波数を 10Hz とする場合、経験的に波長の 1/5~1/10 程度にメッシュ分割する必要があることから、2~4m 程度の解像度が求められる。これほどの解像度で地盤の微細な不均質性を広域で特定することは現代の物理探査技術では限界があるため、この帯域での決定論的な解析は信頼性を担保できないという課題が残っている。

物理モデルの高度化・精緻化が進む一方で、予測値と観測地の間には常に無視できない乖離、ばらつきが存在する。これらを統計的に扱うために、地震動予測を観測された記録から回帰式を構築するという経験的なアプローチをとる、GMM および確率論的地震ハザード評価 (Probability Seismic Hazard

Assessment; PSHA) の枠組みが発展してきた。GMM の構築において、このばらつきは対数正規分布に従う確率変数として扱われ、対数標準偏差によって定量化される^[1-20]。PSHA の枠組みは、原子力建屋などの重要施設における外力評価で用いられ、あらゆる不確実性を考慮することで想定外の事象を減らすことが重要視される。GMM のばらつきを確率変数として扱うこととのシナジーから、両者は相補的に発展してきた。Abrahamson & Bommer (2005)^[1-21]は、全ばらつきを、発生要因に基づき「偶然的不確実性」と「認識論的不確実性」の 2 つに概念的に分類することの重要性を示している。偶然的不確実性とは、自然現象そのものが持つ本質的なランダム性であり、現在の科学的知見やモデルでは説明・削減が不可能な成分である。一方、認識論的不確実性は、データの不足、測定誤差、あるいはモデル化の不完全さに起因するものであり、知見の蓄積や高度なモデルの導入により低減可能な成分である。従来の GMM 構築においては、多くの観測点と多数の地震イベントから得られたデータを回帰分析することで平均的な特性を評価してきたが、ここで暗黙のうちに適用されているのが、「エルゴード性の仮定」である^[1-22]。これは、「空間的な平均」と「時間的な平均」が等価であるとみなす仮定である。そのため、個々のサイトが持つ固有の偏りをもサイト間のばらつきとして一括りに処理されるという課題があった。

このように、物理シミュレーションと統計的モデリングの両面からサイト特性の評価は進められてきたものの、高周波数帯域の複雑な事象は PSHA においては多くの部分を偶然的不確実性として扱われてきた。近年、エルゴード性の仮定を排した、非エルゴード的サイト応答評価への転換が提唱されていることから^[1-23]、従来「偶然的不確実性」として不可避とされてきた変動成分の一部を、サイト固有の「系統的特性」として分離・特定することで、GMM・PSHA の高度化へと貢献することができる。本研究は、この非エルゴード的評価の潮流に位置づけられるものである。

1.2 サイト特性評価に関する研究動向と課題

サイト特性の評価において、1 次元重複反射理論は物理的な第一近似として有用であり、現在においても実務上のデファクトスタンダードとなっているが、近年の大規模な観測データに基づく検証は、その適用範囲が限定的であることを明らかにしている。Thompson et al. (2012)^[1-24]は、防災科学技術研究所が整備する基盤強震観測網 (KiK-net)^[1-25]の約 100 地点を対象に、観測された地表/地中スペクトル比 (Surface-to-Borehole Spectral Ratio; SBSR) と 1 次元理論による TTF の適合度を定量的に分類する手法を提案した。この分析によれば、1 次元理論が統計的に「適合する」と判定されたサイトは 16 地点に留まり、残りの 8 割以上のサイトでは理論で説明できないピークの出現や、著しいばらつきが確認された。同様に、笠松ら (2011^[1-26], 2014^[1-27]) および Ikeura et al. (2021)^[1-28]においても、KiK-net 観測点 355 地点を対象に一次元地盤モデルを評価する検討を行っており、約 2/3 の地点でモデル作成が困難であることを報告している。さらに、Tao & Rathje (2020)^[1-29]は、鉛直アレイ解析における理論的な問題点として「擬似共振 (Pseudo-resonance)」に着目した。彼らは、1 次元理論が予測する鋭いピーク (上昇波と下降波の完全な干渉に起因するもの) が、実際の観測記録では不整形性による散乱効果等で消失している場合が多く、この擬似的なピークをモデル化しようとするのが、評価精度を著しく低下させる要因であることを示した。これらの研究により、山間部や堆積盆地端部な

どの複雑な地盤環境において、1次元理論に基づく評価が物理的な限界を迎えていることは明白となった。

1次元理論の限界を克服するため、前述したような2次元や3次元の物理モデルを用いた数値シミュレーション技術の開発が進められてきた。その有効性と実用性を検証する国際的な枠組みとして、「Effects of Surface Geology (ESG)」に関する一連のシンポジウムが重要な役割を果たしてきた。1992年に小田原で開催された ESG1 (足柄平野) における国際ブラインド予測実験では、複雑な盆地構造の影響が目されたものの、地盤パラメータの不確実性が支配的であったため、統計的には 2D/3D モデルが 1次元モデルよりも有意に優れた予測精度を示すには至らなかった^[1-30]。その後の検証、特に 2006 年の ESG3 (グルノーブル) においても、参加した多くの研究チームによる 3次元シミュレーション結果に大きなばらつきが生じ、モデル化に伴う人為的な不確実性が課題として浮き彫りになった^[1-31]。近年の ESG6 (2016 年熊本地震を対象とした実験) に至り、詳細な 3次元地下構造モデルが整備された条件下でようやく 2D/3D モデルの優位性が実証されたものの^[1-32]、依然として詳細モデルの構築にかかる膨大なコストや労力が、広域評価への適用を阻む実用上の障壁として認識され続けている。すなわち、物理的には 3次元モデルが正解であると分かっているにもかかわらず、実務的なハザード評価において、すべてのサイトで詳細な 3次元モデルを構築・計算することは現実的ではない。したがって、物理シミュレーションに頼り切るのではなく、蓄積された観測データから不整形地盤効果 (3次元効果) を効率的に抽出し、評価モデルに反映させる新たなアプローチが求められている。

1次元理論との乖離が生じる物理的要因の検証と並行して、観測されるサイト特性のばらつきの性質に関する研究も進められている。近年の GMM の分野では、空間的なばらつきを時間的なばらつきと等価とみなす従来のエルゴード仮定からの脱却が進展してきた。Atkinson (2006)^[1-33]や Al Atik et al. (2010)^[1-34]らは、全ばらつきからサイト固有の系統的な成分を分離し、観測点固有の不確実性 (Single-Station Sigma) のみを抽出する「非エルゴード的 (Non-ergodic)」な評価の枠組みを確立した。この手法では、全ばらつきをサイト固有の平均的な偏り ($\delta S2S$) と、単一観測点内でのイベントごとのばらつき (ϕ_{SS} または ϕ_0) に分離して評価する。この潮流の中で、Pilz & Cotton (2019)^[1-35]は KiK-net の観測記録を用いてスペクトルインバージョンにより分離したサイト特性のばらつきを分析している。その結果、2D/3D サイトでは 1次元理論に基づく予測値から系統的な乖離が見られるだけでなく、1次元サイトと比較して単一観測点内でのばらつき (ϕ_0) も有意に大きいことを明らかにした。これは、2D/3D サイトの応答が震源の方位や入射角に対して敏感に変化するためであり、複雑な地盤構造が予測の不確実性を増大させる要因であることを示唆している。

しかし、このようなばらつき分解のアプローチにおいても、依然として解決すべき課題が残されている。それは、単一サイト内で観測される変動の物理的要因、特に地震波の到来方位に依存する変動の帰属が曖昧な点である。Al Atik et al. (2010)^[1-34]により、全ばらつきを震源・経路・サイトの各成分に分解する体系的な枠組みが整備され、経路に起因するばらつき (ϕ_{P2P}) が定義された。これに基づき Rodriguez-Marek et al. (2011)^[1-36]は、単一観測点ごとの変動量 (ϕ_{SS}) を評価したが、彼らのモデルにおいて ϕ_{P2P} は ϕ_{P2P} の中に不可分な成分として内包されており、間接的な評価に留まっている。このため、 ϕ_{SS} として算出された変動の中に方位依存性が含まれていた場合、それが震源からサイトに至る伝播経路の不均質性に起因するものか、それともサイト近傍の地盤構造や波動の入射条件によるものなのかを、GMM の残差分析のみから判別することは困難である。

この変動の帰属問題に対して、より直接的な知見を得るためには、同一地点の鉛直アレイ記録から得られる SBSR の挙動を分析することが有効であると考えられる。SBSR は、理論上、震源特性や深部までの伝播経路特性が分母・分子で相殺されるため、観測される変動はサイト近傍の浅部地盤の影響を強く反映しているとみなせるからである。もし、震源・伝播経路特性が除去された SBSR においても有意な方位依存性やばらつきが確認されるのであれば、それはサイト近傍の複雑さに起因するサイト項としての性質を示唆することになる。これまでの研究では、SBSR の方位依存性が統計的なばらつきにどの程度寄与しているのか、またそれがどのような条件下で顕在化するのかについて、定量的な評価は十分になされていない。

1.3 本研究の目的と構成

以上の背景を踏まえ、本研究は、全国の KiK-net で得られた膨大な地震観測記録を対象に、SBSR の方位依存性を体系的に分析し、観測される変動特性を「系統的ばらつき」と「偶然的ばらつき」に分離・評価することを目的とする。具体的には、以下の 3 点を主要な目的とする。

1) 方位依存性の統計的検証

KiK-net 観測点を対象とした網羅的な解析を行い、SBSR が地震波の到来方位によってどのように変動するかを定量的に評価する。これにより、1 次元理論では説明できない方位依存性が、特殊な事例ではなく、普遍的な現象であることを実証する。

2) 変動要因の特定と分離

従来、伝播経路特性を評価する手法として確立された二重スペクトル法を応用し、SBSR の変動から震源・伝播経路の影響を除去することで、変動の主要因が局所的なサイト特性にあることを検証する。さらに、不整形地盤モデルを用いた数値シミュレーションにより、観測された系統的な変動が定性的に説明可能であることを検証する。

3) 簡易評価手法の提案

観測記録から偶然的ばらつきおよび系統的ばらつきを分離する手法を提案する。また、分離されたばらつきを個別に評価する手法を提案する。偶然的ばらつきは卓越周波数をベースにした評価方法を構築する。系統的ばらつきは、地形・地質情報等の物理パラメータとの関係性を、機械学習等により感度解析を実施し、感度の高いパラメータを用いてグルーピングすることで、詳細な地盤調査を実施せずともサイト特性の変動を推定可能な簡易評価手法を構築する。これにより、非エルゴード的な地震ハザード評価の実務への適用を支援する。

本論文は全 7 章で構成される。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景として、地震工学におけるサイト特性評価の重要性と、従来の 1 次元理論およびエルゴード的仮定に基づく評価手法の限界について述べた。特に、観測データに見られるばらつきの中に、物理的に説明可能な系統的特性が含まれている可能性を指摘し、本研究の目的と意義を提示した。

第2章「地震観測記録のデータベースと地表/地中スペクトル比の方位依存性」では、本研究の基盤となる KiK-net 観測記録のデータベース構築について詳述する。観測記録の選定基準、S/N 比による品質管理、および解析手法について述べた後、具体的な分析結果を示す。まず、不整形地盤を有する KiK-net 鉋子中観測点 (CHBH14) 等を代表事例として取り上げ、到来方向別に計算された SBSR が、1 次元理論では説明できない大きな変動を示すことを実証的に示す。さらに、全観測点を対象とした統計分析を行い、SBSR のピーク周波数や振幅が到来方位に対して有意な変動を示す観測点の割合やその傾向を明らかにする。

第3章「二重スペクトル比法に基づく変動要因の検証」では、観測された SBSR の方位依存性が、真にサイト特性に帰属されるかを検証する。近接する観測点ペアを用いた二重スペクトル比法 (Twofold Spectral Ratio ; TSR) を応用することで、震源特性および震源から基盤までの伝播経路特性 (Q 値等) の影響を相殺・除去する。残差として抽出された変動成分の空間相関分析を通じて、方位依存性が広域的な伝播経路の不均質性ではなく、観測点直下の局所的な地盤構造に起因する現象であることを裏付ける。

第4章「サイト特性における不確実性の整理と不整形地盤サイトにおける物理的検証」では、サイト特性評価における「認識論的不確実性」と「偶然的ばらつき」の概念整理を行う。その上で、第2章で確認された方位依存性が、物理的なメカニズムとして妥当かどうかを検証するため、2 次元有限要素法 (FEM) を用いた数値シミュレーションを実施する。不整形な基盤形状や複雑な地形を有するモデルにおいて、散乱・回折現象が観測記録と同様のスペクトル変動を再現し得ることを定性的に示す。

第5章「地表/地中スペクトル比における偶然的ばらつきと系統的ばらつきの分離」では、観測された SBSR の総変動を分解する枠組みを提示する。2 地震間での SBSR の変動を、2 つの異なるデータセットから評価することで、総変動を「地震ごとにランダムに生じる成分 (偶然的ばらつき)」と、「サイト固有の条件に起因して再現性をもって現れる成分 (系統的ばらつき)」に分離する。

第6章「変動要因の感度解析と簡易評価手法の提案」では、第5章で分離・評価された各ばらつき成分を、実務において予測・評価するための手法を提案する。偶然的ばらつきについては、地盤の卓越周波数による正規化を行うことで、サイトに依存しない共通の特性モデルを構築する。一方、系統的ばらつきについては、地形・地質情報や S 波速度構造、基盤深さ等の物理パラメータを用いた感度解析を実施する。機械学習モデリングにより、系統的ばらつきの大きさに寄与する支配的な因子を特定し、高感度パラメータ群の組み合わせに基づいて観測点を 27 のグループに分類する。最終的に、各グループにおける系統的ばらつきの代表値を提示することで、大規模な数値解析を行わずともサイト特性の不確実性幅を簡易に推定できる手法を提案する。

第7章「結論」では、本研究で得られた知見を総括する。SBSR の方位依存性を考慮し、提案した簡易評価手法を用いることで、従来の平均的な評価手法に比べてサイト増幅特性の予測精度が向上することを確認し、今後の非エルゴード的地震ハザード評価への実装に向けた展望をまとめた。

本研究の検討フローと構成のイメージを図 1-1 に示す。

①方位依存性の統計的検証

②変動要因の特定・分離

③簡易評価手法の提案

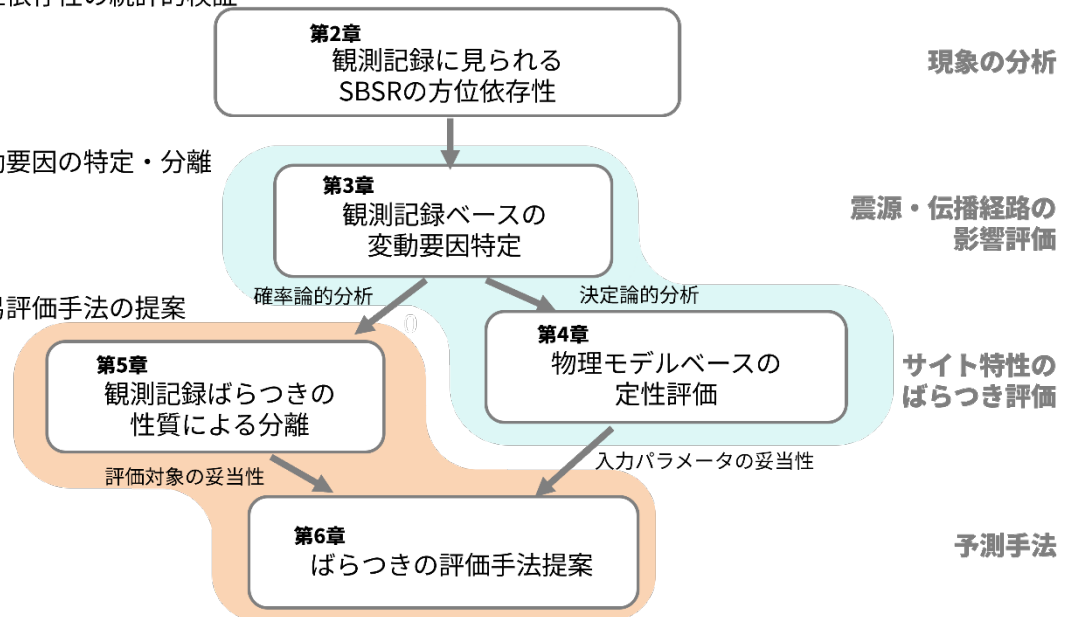


図 1-1 本研究の検討フローと構成

第 1 章の参考文献

- [1-1]Aki, K., & Richards, P. G. (2002). Quantitative Seismology, 2nd Ed. University Science Books.
- [1-2]Kramer S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.
- [1-3]Kanai, K. (1950). The Effect of Solid Viscosity of Surface Layer on the Earthquake Movements. *Bull. Earthq. Inst*, 28, 31-35.
- [1-4]Thomson, W. T. (1950). Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium. *Journal of applied Physics*, 21, 89-93. doi:10.1063/1.1699629.
- [1-5]Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull Seismol Soc Am*, 43(1), 17-34. doi:10.1029/SP030p0086.
- [1-6]Schnabel, P., Seed, H. B., & Lysmer, J. (1972). Modification of seismograph records for effects of local soil conditions. *Bull Seismol Soc Am*, 62 (6), 1649-1664. doi:10.1785/BSSA0620061649.
- [1-7]Bard, P. Y., & Bouchon, M. (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bull Seismol Soc Am*. 75 (2), 519-541. doi:10.1785/BSSA0750020519.
- [1-8]Kawase, H., & Aki, K. (1989). A study on the response of a soft basin for incident S, P, and Rayleigh waves with special reference to the long duration observed in Mexico City. *Bull Seismol Soc Am*. 79 (5), 1361-1382. doi:10.1785/BSSA0790051361.
- [1-9]太田外氣晴(1995) 釧路気象台における強振動と地盤・構造物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 60 巻, 474 号, 77-85. doi:10.3130/aijs.60.77_1.
- [1-10]Kawase, H. (1996). The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect," constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves. *Seismological Research Letters*, 67(5), 25-34. doi:10.1785/gssrl.67.5.25.
- [1-11]Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T., & Sekiguchi, H. (1998). Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 88(2), 428-440. doi: 10.1785/BSSA0880020428.
- [1-12]Aki, K., & K. L. Lerner (1970), Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, 75(5), 933-954, doi:10.1029/JB075i005p00933.
- [1-13]Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the engineering mechanics division*, 95(4), 859-877. doi:10.1061/JMCEA3.0001144.
- [1-14]Lysmer, J., & Waas, G. (1972). Shear waves in plane infinite structures. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 98(1), 85-105. doi:10.1061/JMCEA3.0001583.
- [1-15]Kausel, E., & Peek, R. (1982). Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution. *Bull Seismol Soc Am*, 72(5), 1459-1481. doi:10.1785/BSSA0720051459.
- [1-16]Virieux, J. (1984). SH-wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 49(11), 1933-1942. doi:10.1190/1.1441605.

- [1-17]Frankel, A. (1993). Three-dimensional simulations of ground motions in the San Bernardino Valley, California, for hypothetical earthquakes on the San Andreas fault. *Bull Seismol Soc Am*, 83(4), 1020-1041. doi:10.1785/BSSA0830041020.
- [1-18]Olsen, K. B., Archuleta, R. J., & Matarese, J. R. (1995). Three-dimensional simulation of a magnitude 7.75 earthquake on the San Andreas fault. *Science*, 270(5242), 1628-1632. doi:10.1126/science.270.5242.1628.
- [1-19]日本建築学会 (2015) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会.
- [1-20]Strasser, F. O., Abrahamson, N. A., & Bommer, J. J. (2009). Sigma: Issues, insights, and challenges. *Seismological Research Letters*, 80(1), 40-56. doi:10.1785/gssrl.80.1.40.
- [1-21]Abrahamson, N. A., & Bommer, J. J. (2005). Probability and uncertainty in seismic hazard analysis. *Earthquake spectra*, 21(2), 603-607. doi:10.1193/1.1899158.
- [1-22]Anderson, J. G., & Brune, J. N. (1999). Probabilistic seismic hazard analysis without the ergodic assumption. *Seismological Research Letters*, 70(1), 19-28. doi:10.1785/gssrl.70.1.19.
- [1-23]Rodriguez-Marek, A., Rathje, E. M., Bommer, J. J., Scherbaum, F., & Stafford, P. J. (2014). Application of single-station sigma and site-response characterization in a probabilistic seismic-hazard analysis for a new nuclear site. *Bull Seismol Soc Am*, 104(4), 1601-1619. doi:10.1785/0120130196.
- [1-24]Thompson, E. M., Baise, L. G., Tanaka, Y., & Kayen, R. E. (2012). A taxonomy of site response complexity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 32-43. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.04.005.
- [1-25]National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004
- [1-26]笠松健太郎, 池浦友則, 土方勝一郎(2011) KiK-net 地点における解放基盤地震動評価のための地盤モデル最適化検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, 183-184.
- [1-27]笠松健太郎, 池浦友則, 岡崎敦(2014) KiK-net 地点における応答スペクトルのはぎとり倍率, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, 413-414.
- [1-28]Ikeura, T., Kasamatsu, K., & Okazaki, A. (2021). Optimization analyses of one-dimensional ground structure models at KiK-net sites. *The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, SS2-I01.
- [1-29]Tao, Y., & Rathje, E. (2020). Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105865. doi:10.1016/j.soildyn.2019.105865.
- [1-30]Midorikawa, S. (1992). A statistical analysis of submitted predictions for the Ashigara Valley blind prediction test. In *Proceedings of the International Symposium on the effects of surface geology on seismic motion*, 65-77.
- [1-31]Chaljub, E., Maufroy, E., Moczo, P., Kristek, J., Hollender, F., Bard, P. Y., Priolo, E., Klin, P., De Martin, F., Zhang, Z., Zhang, W., & Chen, X. (2015). 3-D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: testing accuracy through stringent models. *Geophysical Journal International*, 201(1), 90-111. doi:10.1093/gji/ggu472.

- [1-32]Tsuno, S., Nagashima, F., Kawase, H., Yamanaka, H., & Matsushima, S. (2023). Predicted results of weak and strong ground motions at the target site of the blind prediction exercise as steps-2 and-3, Report for the experiments for the 6th international symposium on effects of surface geology on seismic motion. *Earth, Planets and Space*, 75(1), 130. doi:10.1186/s40623-023-01885-6.
- [1-33]Atkinson, G. M. (2006). Single-station sigma. *Bull Seismol Soc Am*, 96(2), 446-455. doi:10.1785/0120050137.
- [1-34]Al Atik, L., Abrahamson, N., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794-801. doi:10.1785/gssrl.81.5.794.
- [1-35]Pilz, M., & Cotton, F. (2019). Does the one-dimensional assumption hold for site response analysis? A study of seismic site responses and implication for ground motion assessment using KiK-Net strong-motion data. *Earthquake Spectra*, 35(2), 883-905. doi:10.1193/050718EQS113M.
- [1-36]Rodriguez-Marek, A., Montalva, G. A., Cotton, F., & Bonilla, F. (2011). Analysis of single-station standard deviation using the KiK-net data. *Bull Seismol Soc Am*, 101(3), 1242-1258. doi:10.1785/0120100252

第 2 章 地震観測記録のデータベースと

地表/地中スペクトル比の方位依存性

2.1 概要

第 1 章で述べたように、サイト特性の評価には不確実性が伴う。従来の 1 次元重複反射理論に基づく評価では、地盤を水平成層構造と仮定し地震動は鉛直下方から入射する平面波として扱われる^[1-2]。しかし、実際の地盤構造は必ずしも水平成層ではなく、傾斜や不整形性を有する場合が多い。この手法は計算コストが低く、成層地盤においては一定の精度を有するが、盆地端部や傾斜基盤といった不整形地盤を有する場面においては、その適用限界が指摘されている^[1-24]。また、観測される地震動は様々な方向から到来し、散乱や回折を含む複雑な波動場を形成する^[1-10]。このため、観測される地表/地中スペクトル比 (Surface-to-Borehole Spectral Ratio; SBSR) は、同一地点であっても地震イベントごとに大きな変動を示すことが知られている^[1-24]。この変動は、従来の地震動予測モデル (Ground Motion Model; GMM) においては偶然的な不確実性として扱われてきたが、近年ではその一部がサイト固有の物理的要因に起因する認識論的な不確実性である可能性が議論されている^[2-4]。本章では、KiK-net 地震観測記録^[2-5]を用いた分析により、地盤の線形範囲内における SBSR のばらつきを定量的に把握し、その要因を明らかにする。本章は以下の 3 段階で構成する。まず、全 KiK-net 観測点を対象とした統計により、地盤の線形範囲内における SBSR のばらつきを定量的に把握する。次に、表層に不整形地盤を有すると考えられる特定観測点 (KiK-net 銚子中観測点) を対象とした詳細解析を行い、その変動が地震波の到来方向に依存する現象 (方位依存性) であることを検証する。最後に、多変量解析を用いて全観測点における変動要因を統計的に検定し、方位依存性が特定の地点に限らない普遍的な現象であり、入射角よりも支配的な要因であることを示す。

2.2 Transverse 成分に基づく全 KiK-net 観測点の SBSR 変動評価

本検討では、日本全国に鉛直アレイが展開されている KiK-net の地震観測記録を使用し、SBSR のばらつきを定量評価し、どのような変動を示すかを概観する。解析にあたっては、地震波の進行方向に直交する成分である Transverse 成分 (水平せん断波 : SH 波に相当) に着目する。Transverse 成分は、単純化された 1 次元等方モデルにおいては P-SV 変換の影響を受けず、純粋な SH 波の多重反射として記述されるため、サイト特性評価において地盤のせん断剛性構造を反映しやすい^[1-2]。一方で、地盤に 3 次元的不整形や異方性、散乱体等が存在する場合、Transverse 成分には Love 波の生成や SH-SV カップリングによる複雑な挙動が現れる。したがって、Transverse 成分のばらつきを分析することは、1 次元理論からの逸脱を検出する上で感度の高いアプローチとなりうる。

2.2.1 解析対象観測点および地震記録の選定

本検討では、KiK-net の全観測点（約 700 地点）を対象にデータベースを構築した。このうち、地表および地中の加速度計が共に正常に稼働しており、かつ十分な観測記録数が蓄積されている観測点を選定した。各観測点において、観測開始から 2024/4/30 までに観測された地震記録を収集対象とした。なお、対象とする地震は、下記の条件をもとに選定した。

- 地震規模

解析の信頼性を確保するため、S 波主要動部分のフーリエスペクトルがノイズレベルに対して十分な振幅を有している（S/N 比が一定以上である）記録を対象とすることを目的に、気象庁マグニチュード（ M_J ）が 4.0 以上の地震を対象とした。

- 地表最大加速度（Peak Ground Acceleration; PGA）

サイト特性の本来のばらつきを評価するためには、地盤の非線形化による見かけの変動を極力排除する必要がある。そのため、野口・笹谷(2011)^[2-6]を参考に、PGA が 1-50cm/s² の範囲の記録のみを解析対象とした。

- 地震イベントの単一性

単一の震源に由来する地震動を抽出するため、JMA2001 走時表（上野他，2002^[2-7]）を用いた走時に基づき、複数の地震が時間的に近接して発生し、波形が重複する可能性のある地震を除外するスクリーニングを行った。

最終的なデータセットは 693 観測点における 6,973 地震、合計 152,352 記録で構成された。主要なパラメータの分布を図 2-1 に示す。同図には、 M_J 、震源深さ、PGA、震央距離、震源距離、および見かけの入射角のヒストグラムが含まれる。なお見かけ入射角は、層境界での反射や屈折を考慮せず、震源と観測点を結ぶ直線経路から算出した角度である。

Histograms of Earthquake Parameters

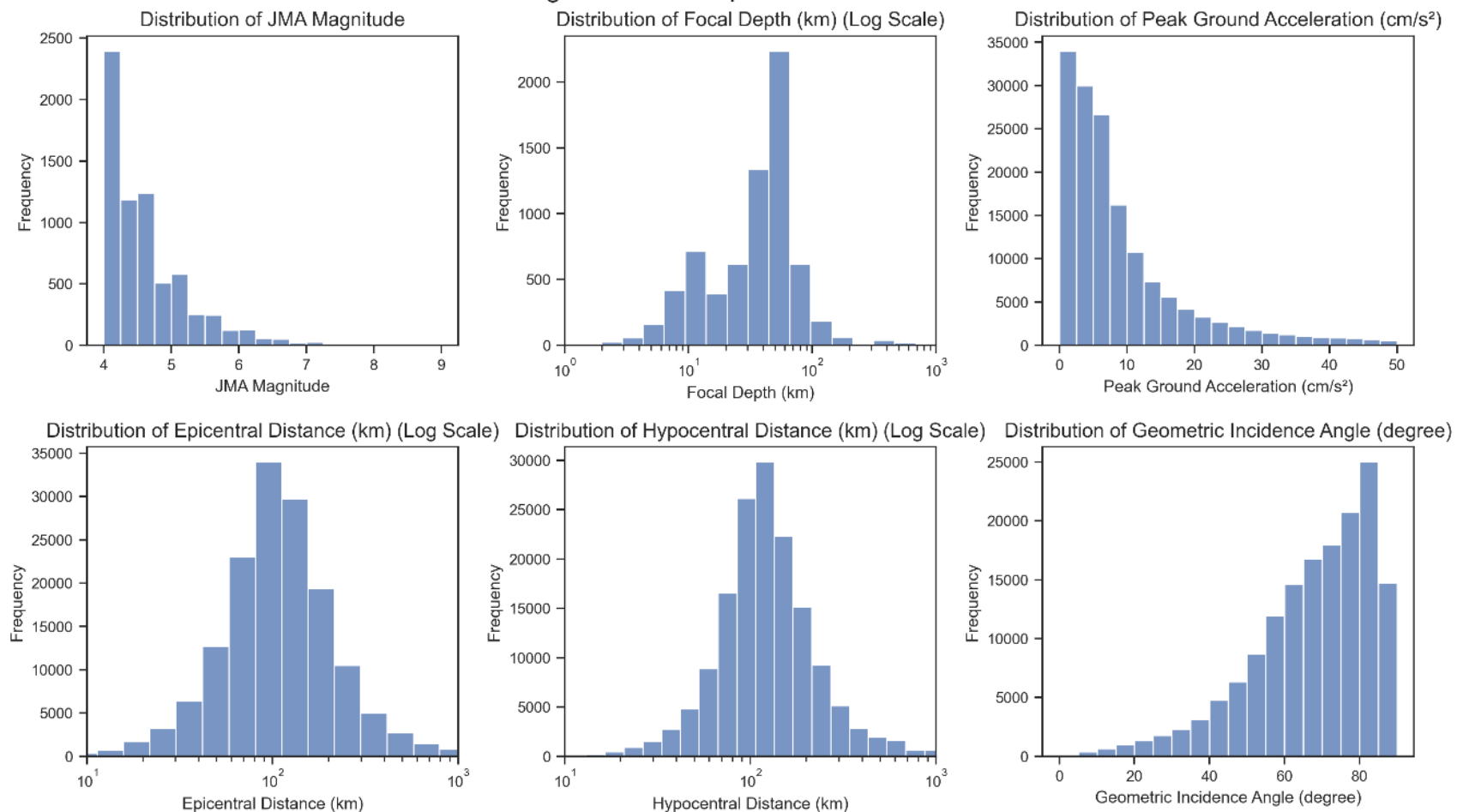


図 2-1 構築したデータセットのヒストグラム

2.2.2 データ処理およびばらつきの定量評価

観測された水平 2 成分（NS 成分，EW 成分）の加速度時刻歴波形に対し，気象庁地震月報^[2-8]の情報に基づき算出された震源方位を用いて座標回転を行い，Radial 成分および Transverse 成分を作成した。地中の設置方位は Hi-net で公開される方位補正角^[2-9]に加え，方位補正角データの無い観測点では規模の大きい地震の地表と地中の長周期波形が一致する角度を確認した上で方位補正を施した。同一観測点でも，計器の盛り替え等で時期により SBSR に明瞭な異なる傾向が見られた場合は，より新しい記録を対象とした。また，明瞭な方位角の一致が見られなかった観測記録は対象外とした。なお，前節で構築したデータベースは，本スクリーニングも適用した後のデータセットである。表 2-1 に，汐見(2012)^[2-9]で方位補正角が明示されていなかったものの，長周期波形が一致せずに修正・除外した観測点の一覧を示す。

SBSR は，Transverse 成分を対象とし，地表および地中記録の全長を用いたフーリエスペクトルにバンド幅 1Hz の Parzen 窓を施したのち，比をとることで算出した^[2-6]。また，第 1 章で議論したように多くの構造物に影響する帯域であり，表層地盤の特性が強く反映される 1-10Hz の周波数帯を検討対象とした。

表 2-1 個別に設置方位補正を実施した観測点一覧

	対象期間			補正角			内容
	開始日	～	終了日	Hi-net (地中)	本検討		
					地中	地表	
AICH06		～	2000/10/06	179	—	—	地中記録長周期成分のS/N比が悪いため対象外
AICH21		～	2007/12/20	1	—	—	地中記録長周期成分のS/N比が悪いため対象外
AKTH06		～	2012/11/25	14	14	14	Hi-net地中を基に地表を調整
AKTH06	2012/11/26	～		4	4	14	Hi-net地中を基に地表を調整
FKOH07		～	2002/05/24	-85	-85	10	Hi-net地中を基に地表を調整
FKOH09		～		47	47	-18	Hi-net地中を基に地表を調整
FKSH09		～		-85	-85	-25	Hi-net地中を基に地表を調整
FKSH17		～		163	163	-15	Hi-net地中を基に地表を調整
GNMH10	2003/07/12	～		-11	-11	-96	Hi-net地中を基に地表を調整
HDKH05	2003/07/04	～	2013/10/07	-2	-2	-37	Hi-net地中を基に地表を調整
HDKH05	2013/10/08	～		6	6	-49	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH04		～	2002/04/05	11	11	-3	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH09		～	2002/04/08	-12	-12	-20	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH09	2002/04/09	～	2008/03/01	-7	-7	-20	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH14		～		1	1	-14	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH15		～		2	2	-8	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH17		～		4	4	-6	Hi-net地中を基に地表を調整
HRSH18		～		2	2	-18	Hi-net地中を基に地表を調整
HYGH04		～	2015/01/17	-6	-6	-166	Hi-net地中を基に地表を調整
HYGH05		～		0	—	—	長周期波形の一致度低いため除外
HYGH13		～	2016/09/08	0	0	-35	Hi-net地中を基に地表を調整
HYGH14		～	2007/07/16	0	0	-20	Hi-net地中を基に地表を調整
HYGH14	2007/07/17	～		1	1	-20	Hi-net地中を基に地表を調整
ISKH01		～	2002/04/02	-178	—	—	長周期波形の一致度低いため除外
ISKH01	2002/04/03	～	2005/05/22	-176	—	—	長周期波形の一致度低いため除外
IWTH06		～		1	1	-49	Hi-net地中を基に地表を調整
IWTH23		～	2014/02/29	0	0	45	Hi-net地中を基に地表を調整
KGSH03	2002/05/21	～	2004/12/14	-156	-156	4	Hi-net地中を基に地表を調整
KGSH11		～	2010/01/20	-2	-2	12	Hi-net地中を基に地表を調整
KGSH11	2010/01/21	～		-3	-3	12	Hi-net地中を基に地表を調整
KKWH01	2008/01/01	～		2	—	—	地表NS成分のScale Factorに不具合か
KKWH08		～		3	3	23	Hi-net地中を基に地表を調整
KKWH15		～	2007/04/19	-4	-4	180	NS, EWが反転
KMMH02		～	2016/03/13	-2	-2	8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH02	2016/03/14	～		2	2	8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH05		～	2016/12/06	-2	-2	5	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH05	2016/12/07	～		-1	-1	5	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH07		～	2010/02/17	-3	-3	-8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH08		～	2002/04/13	0	0	-8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH08	2002/04/14	～	2016/10/06	0	0	-8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH08	2016/10/07	～		-1	-1	-8	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH11		～	2002/05/22	-76	-76	-10	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH11	2002/05/23	～	2014/02/08	-41	-41	-10	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH11	2014/02/09	～		0	0	-10	Hi-net地中を基に地表を調整
KMMH12		～	2007/07/29	-1	-1	180	NS, EWが反転
KNGH20		～	2004/06/06	9	9	180	NS, EWが反転
KNGH22		～		—	—	—	地中記録長周期成分のS/N比が悪いため対象外
NIGH16	2010/01/01	～		1	—	—	地中EW成分Scale Factorに不具合か
OITH01	2000/10/01	～	2002/04/30	109	—	—	地表NS成分のScale Factorに不具合か
OITH03		～	2000/07/31	-5	—	—	地表EW成分のScale Factorに不具合か
OKYH09	2004/07/01	～	2007/08/31	2	—	—	地表EW成分のScale Factorに不具合か
YMNH08		～	2012/02/06	15	—	—	地中EW成分Scale Factorに不具合か

各観測点において、抽出された全地震イベントに対する SBSR の対数平均および対数標準偏差 (σ_{SBSR}) を算出した。なお、本研究における対数標準偏差は自然対数 (ln) で定義する。図 2-2 に示すように、線形範囲内であるにもかかわらず、 σ_{SBSR} が 0.5 を超えるような大きなばらつきを示すケースが確認された。この値は、GMM において通常想定されるサイト特性のばらつきと同程度であり^[2-10]、サイト固有の応答特性自体が不確定性を有していることが示唆される。

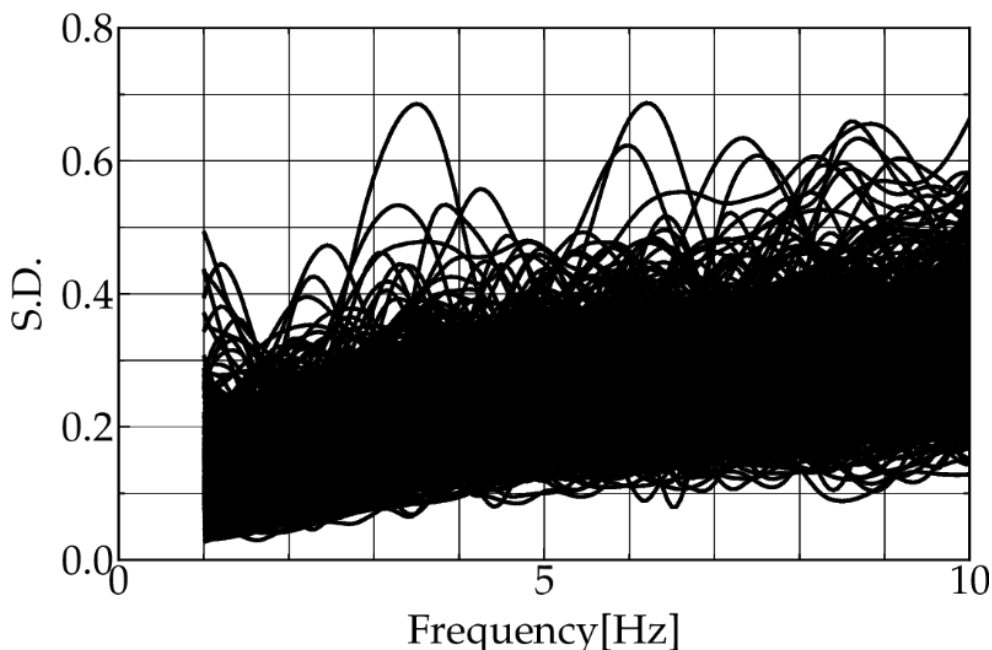


図 2-2 全観測点の自然対数標準偏差 σ_{SBSR}

2.2.3 物理パラメータとばらつきの関係

前節で確認された大きなばらつきの支配要因を解明するため、まず震源・パス特性を表す巨視的な物理パラメータとの関係を確認した。図 2-3 にサイトの特徴を表すパラメータと SBSR のばらつきの散布図を示す。サイトパラメータとしては、以下の 4 つのパラメータを比較対象とした

- ・ 30m 平均 S 波速度 ($AVS30$)

GMM でも頻繁に使用される、表層のサイト特性をよく説明するサイトパラメータ。表層 30m の S 波速度を基に、以下の式から S 波の平均伝播速度が算出される。

$$AVS30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / V_{s_i}} \quad \text{式 (2-1)}$$

ここで、 i は PS 検層の層番号、 n は 30m に達するまでの層数、 H は各層の層厚、 V_s は各層の S 波速度を表す。

- ・ 地中地震計の設置深度 (D_{hole})

SBSR のばらつきであるため、表層だけでなく地中地震計に関するパラメータも影響があることを念頭に選定した。地中地震計が深い位置にある場合、より広範囲の波動場が影響し変動として現れる可能性を考慮した。

- ・ 地表-地中地震計間の平均 S 波速度 (AVS_{hole})

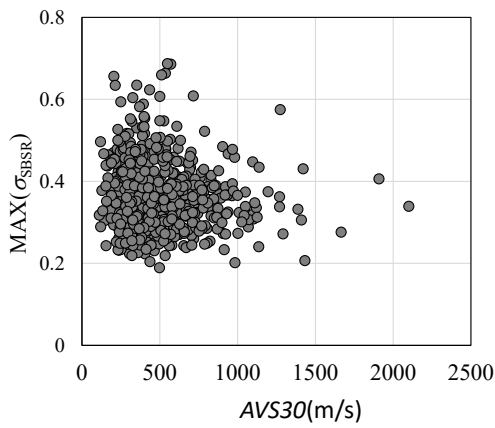
AVS_{30} と同様の指標であるが、地中地震計までのS波速度構造を基に算出する指標。より深くのS波速度を参照することで、より実態に則した指標となることを期待して選定した。以下の式で表される。

$$AVS_{hole} = \frac{D_{hole}}{\sum_{i=1}^n H_i / V_{Si}} \quad \text{式 (2-2)}$$

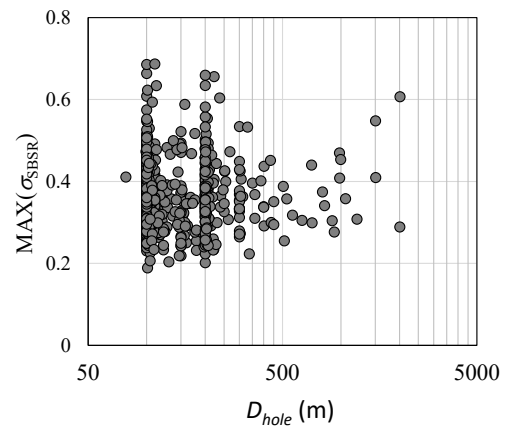
- ・ 平均インピーダンス比 (AVS_{hole}/AVS_{10})

AVS_{hole} と、 AVS_{30} よりも表層の特徴を示す10m平均S波速度(AVS_{10})との比から算出する。インピーダンス比に相当する指標として選定した。インピーダンス比は、異なる媒質の境界を通過する波動の増幅率を簡易的に算出する指標である。

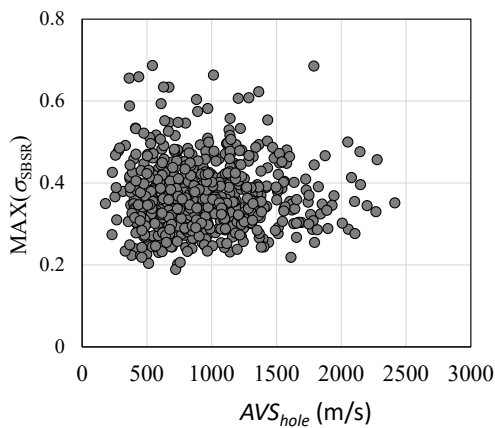
それぞれ、観測点で公開されているPS検層を基に算出した。 $SBSR$ のばらつきは、1-10Hzの範囲において最大となる σ_{SBSR} を代表値とした。これらのパラメータとばらつきの大きさと間に有意な相関傾向は認められなかった。



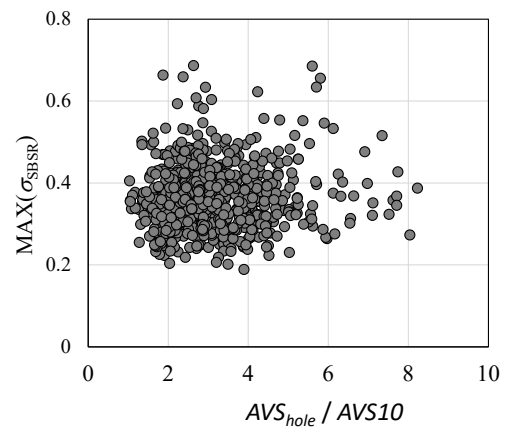
(a) AVS_{30} との比較



(b) D_{hole} との比較



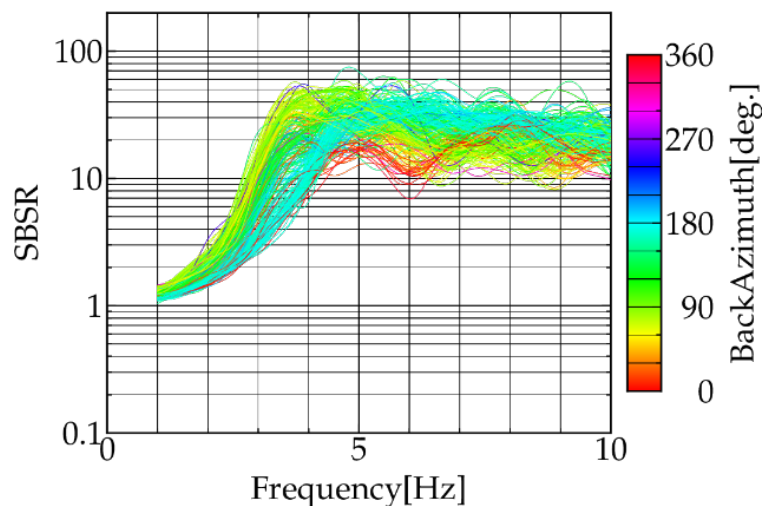
(c) AVS_{hole} との比較



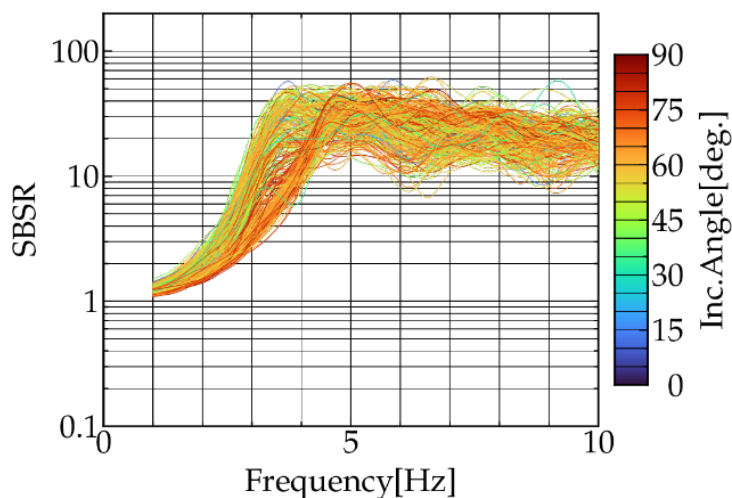
(d) AVS_{hole}/AVS_{10} との比較

図 2-3 サイトパラメータと全観測点のばらつきの比較

次に、幾何学的な到来条件（方位・入射角）が変動に与える影響を検討するため、大きなばらつきを示す代表的な観測点である MYGH13 を例に挙げ、その挙動を詳細に確認する。図 2-4 は、同観測点における全イベントの SBSR を重ね書きしたものであり、(a)は地震波の到来方向ごと、(b)は見かけの入射角ごとに色分けを行っている。(b)の入射角による色分けでは、各色がランダムに混在しており系統的な傾向は見られない。対照的に、到来方向で色分けした図では、特定の周波数帯域において、類似した方位を持つイベント群（同系色の波形）が類似したスペクトル形状を示し、振幅の増幅・減衰の傾向が方位ごとに明瞭にグルーピングされている様子が確認できる。Thompson et al. (2012) [1-24]は、サイト応答のばらつきが大きさが地盤構造の複雑性と相関することを示唆している。本検討における MYGH13 の事例は、その複雑性が方位依存性として現れていることを示しており、ばらつきの主要因が入射角ではなく、地震波の到来方向にある可能性を示唆している。次節以降では、この仮説を検証するため、CHBH14 を用いた詳細解析および全観測点を用いた統計的検定を行う。



(a) 到来方向



(b) 入射角

図 2-4 MYGH13におけるSBSR

2.3 特定観測点における方位依存性の事例

2.3.1 KiK-net 鉾子中観測点の選定理由

前節で確認されたばらつきの物理的メカニズムを解明するため、詳細検討の対象観測点を選定する。MYGH13 のように極端なばらつきを示す地点は現象の確認には適しているが、地震活動の偏りや周辺の地盤情報の乏しさなど、詳細な検討に耐えうる条件は満たしていない。

そこで本節では、KiK-net 鉾子中観測点 (CHBH14) を分析対象とする。同観測点は、前節の標準的な処理 (Transverse 成分) では MYGH13 ほど極端なばらつきを示さないものの、検層データおよび標準貫入試験から表層地盤に傾斜構造等の不整形性が存在することが示唆される。特に、CHBH14 観測点は千葉県の最東部に位置しており、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートの沈み込み帯が近く、全方位から多数の地震記録が得られている点で適している。この全方位の地震記録があることは、ばらつきの要因と考えられる方位依存性を検証する上で重要な条件であり、CHBH14 は事例分析に適した観測点であると言える。

図 2-5 に、周囲の標準貫入試験結果^[2-11]と KiK-net (CHBH14 地点) における PS 検層結果^[2-5]を示す。左図は各試験が実施された位置を、右図は試験結果の断面図をそれぞれ示したものである。断面図における N 値および S 波速度は、太田・後藤(1976)^[2-12]の式により概ね対応した範囲を同色としている。ここで、S 波速度が 300 m/s 以上 (N 値 40 以上) になると考えられる深度境界を図中の黒実線で示す。ただし、太田・後藤の式^[2-12]における N 値に対する S 波速度は倍半分程度のばらつきがあるため、CHBH14 周辺は PS 検層の速度層境界を重視して境界線を引いた。

対象とした地震は、2.2 節で構築したデータベースより S/N 比の良い記録を使用することを目的に、PGA が 10-100cm/s² の範囲の記録を対象とした。また、地中地震計の設置深度が深く、一次固有周波数が低周波数帯域であることから、0-5Hz を解析対象範囲とし、バンド幅 0.2Hz の Parzen 窓スムージングを施した SBSR を分析対象とする。図 2-6 に、対象とした 68 地震の空間分布を示す。

SBSR の全体的な傾向を把握するために、全地震の Transverse 成分の平均 SBSR と、

表 2-2 に示す地盤モデルによる SH 波理論伝達関数とを比較した。地盤モデルは PS 検層結果を基に設定しており、Q 値は慣例的に $V_s/10$ とした。図 2-7 に SBSR の比較図を示す。理論伝達関数は、平面波を鉛直下方入射した際の $SBSR(2E/(E+F))$ を示す。なお地中の E+F 波の計算位置は、CHBH14 観測点の地中地震計設置深度と同じとし、における第 9 層下面とした。観測記録の SBSR では、0.71 Hz, 1.37 Hz, 2.25 Hz, 3.38 Hz にピークが見られる。ここで、観測記録の平均 SBSR において見られる各ピークを低周波数側から P1, P2, P3, P4 とし、以降の検討における対象周波数帯とする。SH 波理論伝達関数と比較すると、P1, P2 についてはピーク位置が比較的良好に整合している。一方で高周波数側の P3 や P4 付近では理論伝達関数とピーク位置が対応していない。

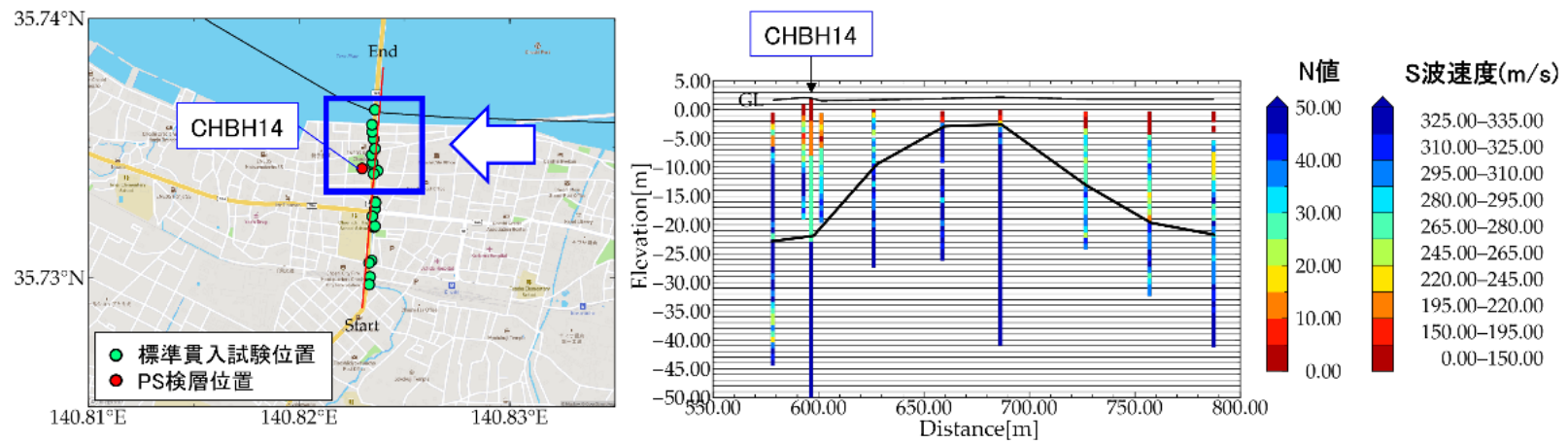


図 2-5 CHBH14観測点周辺におけるN値とS波速度の断面図

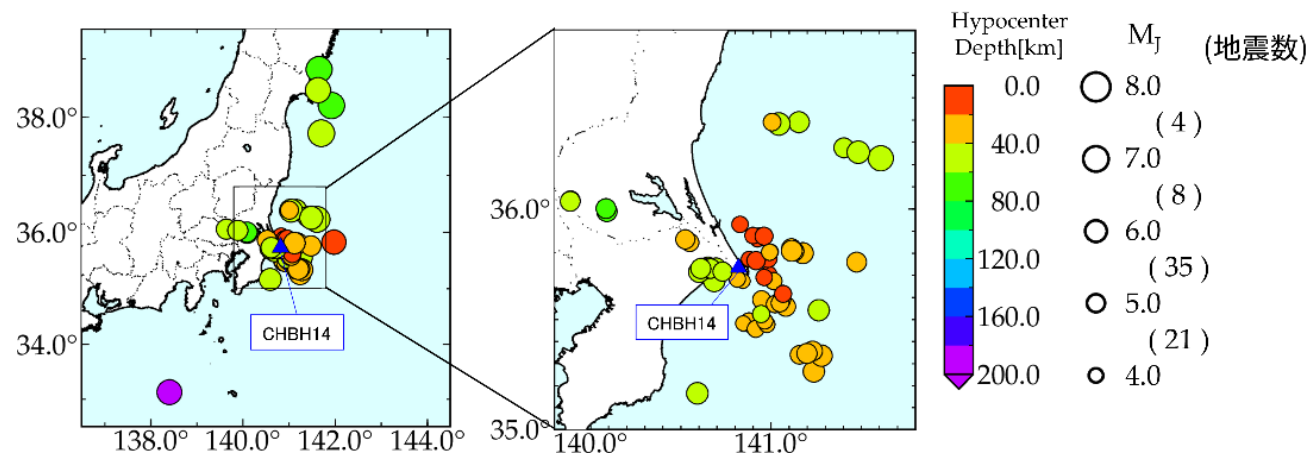


図 2-6 観測点と対象地震震央位置図

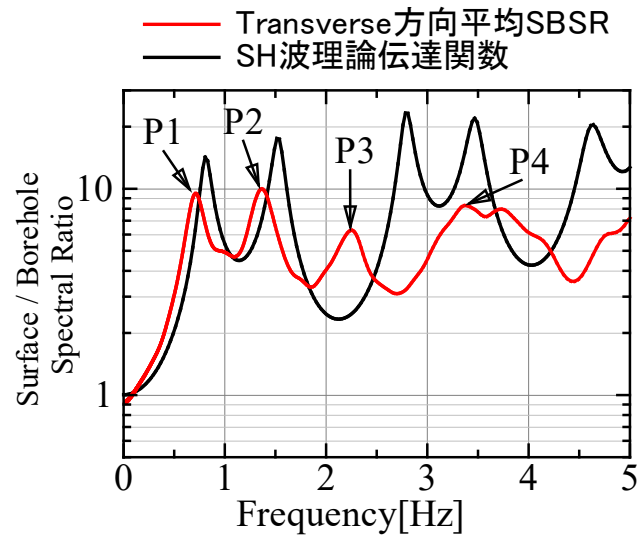


図 2-7 Transverse 方向の平均 SBSR と理論伝達関数 ($2E/(E+F)$)

表 2-2 銚子中観測点における PS 検層に基づく地盤モデル

No	ρ (g/cm ³)	Vs(m/s)	Q	Thickness(m)
1	1.9	80	8	4
2	1.9	200	20	6
3	1.9	270	27	15
4	1.9	360	36	25
5	1.9	540	54	30
6	1.9	1850	185	60
7	1.9	1690	169	260
8	1.9	1800	180	80
9	1.9	2330	233	45
10	1.9	2330	233	—

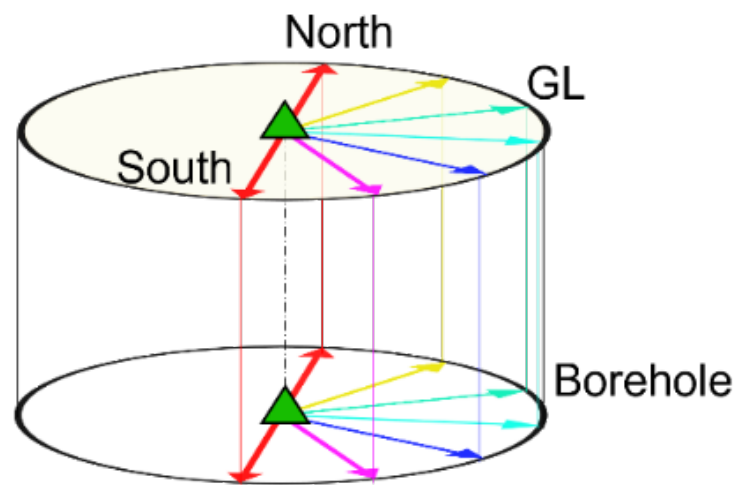
2.3.2 座標回転処理による最大/最小振幅比の評価

地震動記録の方位による SBSR の変動を把握するため、ピーク位置の遷移に着目して評価を行った。一般に、不整形地盤においては水平動の SH 波と SV 波が混成するため、単一の方位のみではその特性を捉えきれないと考えられる。そこで、全回転角中の最大振幅と最小振幅の比（最大/最小振幅比）を指標として導入した。もし地盤構造が理想的な水平成層であれば、水平方向の応答は等方的となり、この比は 1 に近い値をとるはずである。

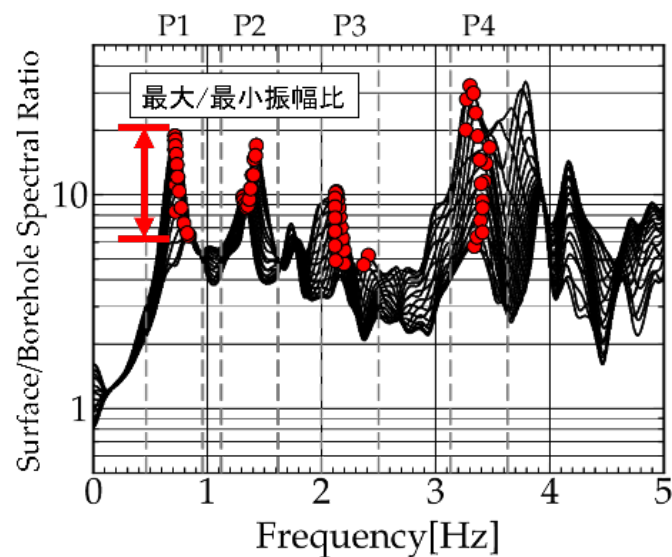
はじめに、各地震において地表・地中の記録ともに、座標軸を 10° ピッチで回転し、0° ～180°（北から時計回り）の範囲の方位ごとの観測 SBSR を算出した。180° ～360° に関しては、0° ～180° と点对称の関係にあり同じ振幅の SBSR が得られるため省略している。図 2-8(a)に、地震動記録の方

位ごとに算出する SBSR の模式図を示す。また、図 2-8(b)に方位ごとに算出した観測 SBSR の例を黒線で示す。

続いて、ピーク位置での振幅値を抽出した。抽出対象としたピークは図 2-7 に示す 4 つのピークである。P1～P4 の $\pm 0.25\text{Hz}$ の範囲の中から、上に凸かつ最大の振幅を持つ点を方位ごとの SBSR のピークとし、方位ごとに 1 点ずつピーク値を選定した。図 2-8(b)に観測 SBSR のピークを抽出した結果の例を赤い○印で示す。ピーク位置の変動は、各地震の全方位のピーク値のうち、SBSR の最大振幅と最小振幅の比（以降、最大/最小振幅比と表記）で評価し、地震ごと、ピーク周波数帯ごとに 1 つの最大/最小振幅比が求まるようにした。



(a) 模式図



(b) 地震動記録の方位によるSBSRの変動の例
(2005/5/19 銚子市付近の地震, $M_j 5.4$)

図 2-8 地震動記録の方位ごとに算出するSBSR

2.3.3 入射場に関するパラメータと最大/最小振幅比の関係の分析

CHBH14 観測点を対象に、最大/最小振幅比により評価されるピーク位置の変動と、入射波動場に関わるパラメータとの関係について分析を行った。入射波動場に関わるパラメータとして、入射角および地震波到来方向を比較対象とした。

2.3.3.1 最大/最小振幅比と入射角との関係

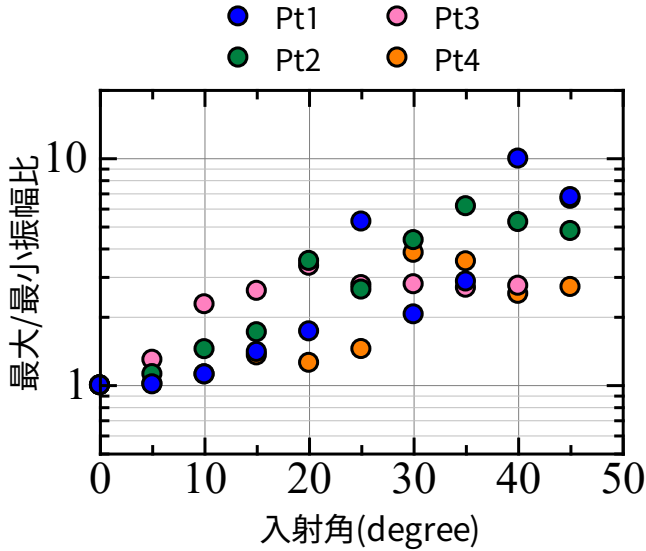
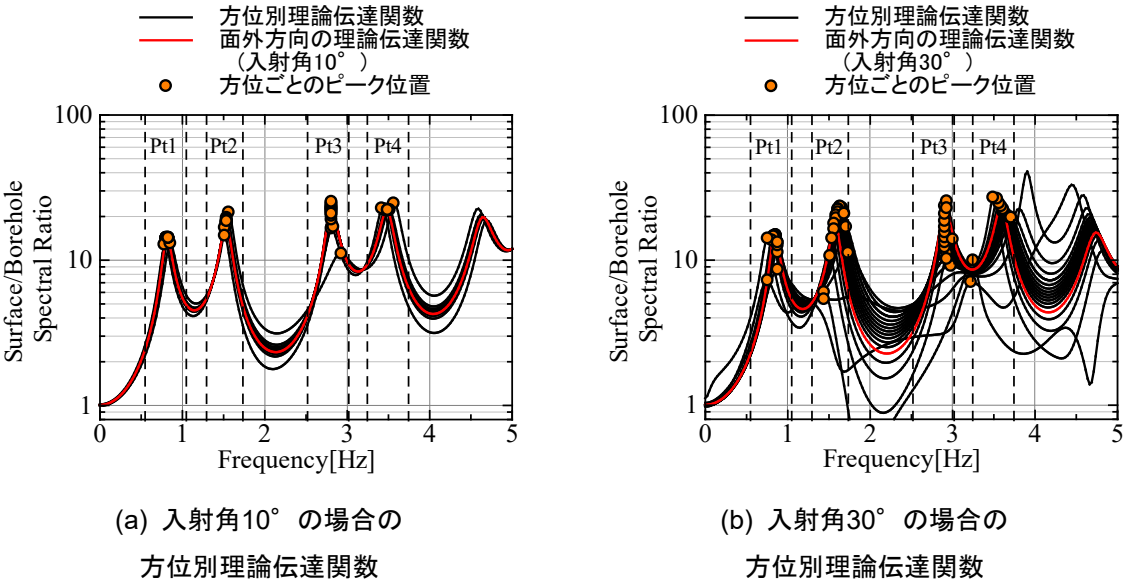
まず、1次元地盤構造でも水平成分の差異に影響が出る要因として考えられる、入射角との関係を確認した。表 2-2 に示す地盤モデルを用いて 1 次元重複反射の理論計算により入射角の影響を確認したところ、入射角が大きくなるにつれ最大/最小振幅比は大きくなる傾向にあった。図 2-9(a)および(b)に、入射角を 10° 、 30° とした際の理論伝達関数の方位によるピークの変動を示す。面外方向、面内方向それぞれにおいて、40.96 秒間の位相のみをランダムとした擬似ランダム波 (0.01 秒サンプリング) を最下層から入射し、地表の振動 (2E 波) と地中の振動 (深さ 525 m 位置の E+F 波) を計算した。面内方向の振動を NS 成分、面外方向を EW 成分と仮定し、前節で示した方法によりピーク位置の変動を評価した。なお、平面波を鉛直下方入射した際の SH 波理論伝達関数におけるピーク周波数帯を Pt とし、 $Pt1 = 0.81 \pm 0.25 \text{ Hz}$ 、 $Pt2 = 1.51 \pm 0.25 \text{ Hz}$ 、 $Pt3 = 2.78 \pm 0.25 \text{ Hz}$ 、 $Pt4 = 3.47 \pm 0.25 \text{ Hz}$ の範囲を評価対象とした。図 2-9(a)、(b)中にピーク周波数帯の範囲を破線で示す。図 2-9(c)に、入射角を $0^\circ \sim 45^\circ$ とした場合の各ピークの最大/最小振幅比を示す。入射角は面内方向に沿って変化させている。入射角が大きいくほど、方位によるピークの変動が大きいくことが確認できる。また、図 2-9(c)でのピーク位置は主に振幅値が変動しており、ピーク周波数のずれは顕著にはみられない。図 2-7 における P3 のように理論伝達関数ではピークが無い周波数帯にピークが表れることは、速度構造が正しいと仮定すると 1 次元地盤構造による入射角の違いでは説明が難しい。

観測 SBSR における入射角と最大/最小振幅比の関係を図 2-10 下段に示す。入射角はスネルの法則を基に算出した。表 2-2 に示す地盤モデルの下に J-SHIS による深部地盤モデル^[2-13]を付加した地盤構造モデルを用いて、地中地震計設置位置である第 9 層への入射角を算出した。図中の口印は、対象とする入射角から $\pm 2.5^\circ$ の範囲にある地震の最大/最小振幅比の幾何平均を、エラーバーはその自然対数標準偏差を示す。ただし、 $0^\circ \sim 10^\circ$ においてはサンプル数が少なかったため、 $5^\circ \pm 5^\circ$ として 1 つの範囲にまとめた。各ピークについて、全地震の平均値と各入射角の対象範囲における平均が異なるかどうかを、 t 検定を用いて検討する。 t 検定は、異なる 2 つの標本グループにおける平均の差が誤差の範囲内にあるか調べる手法であり、同一の母集団からのサンプルであるかを判定する際に用いられる^[2-14]。本検討においては有意水準を 5 % とし、各範囲における p 値 (全地震の平均と対象範囲の平均との差が偶然誤差の範囲内にある確率) が有意水準を下回るときに有意差があると判断した。図 2-10 の上段に対象範囲のサンプル数、中段に t 検定による p 値を示す。

全地震の平均から有意に異なる範囲に着目すると、P4 では入射角が $10^\circ \sim 20^\circ$ 付近では平均値が有意に小さく、 27.5° では有意に大きくなっており、やや入射角との相関がみられる。一方、P1~P3 においては有意差のある範囲が少なく明瞭な傾向は見られない。

また、いずれのピークにおいても 40° 以上では標準偏差が小さくなっている。これらに該当する地震を確認すると、遠方のマグニチュードの大きい地震に偏っており、実地震波の入射角とスネルの法

則によって求めた入射角との乖離や、マグニチュードが大きいことにより多様な散乱波や表面波が混在し、入射角による違いが出にくくなっていることなどが要因として考えられる。



(c) 1次元重複反射理論による
最大/最小振幅比と入射角の関係

図 2-9 入射角を変えた理論伝達関数の記録方位によるピークの変動

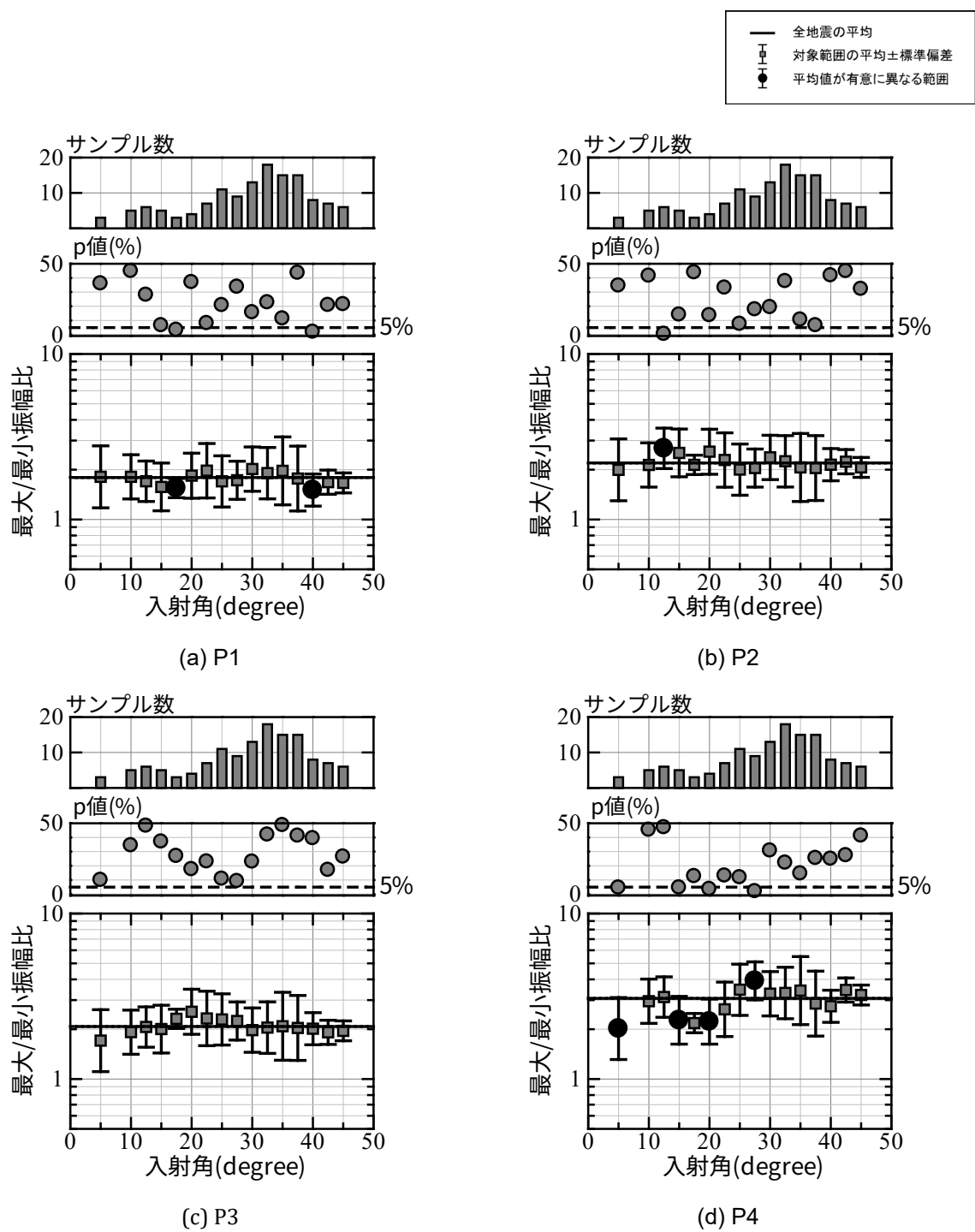


図 2-10 記録方位によるSBSRの変動（最大/最小振幅比）と入射角の関係

2.3.3.2 最大/最小振幅比と地震波到来方向との関係

続いて、地震波到来方向との関係を確認する。地震波到来方向により SBSR の変動する要因としては、1 次元構造の仮定や表面波の生成などによる平面波入射仮定との乖離が考えられる。

図 2-11 下段に観測 SBSR における地震波到来方向と最大/最小振幅比との関係を示す。図中の□印は、対象とする到来方向から $\pm 5^\circ$ の範囲にある地震の最大/最小振幅比の幾何平均を、エラーバーはその自然対数標準偏差を示す。前節と同様、t 検定を用いて全地震と対象範囲の平均に有意な差があるかを検討した。P1, P4 においては、到来方向が 90° 近辺のときに最大/最小振幅比が有意に大きくなる傾向が見られる。P2, P3 においても平均値に有意差はないものの、 90° 近辺では標準偏差が大きくなっており、SBSR の変動は地震波到来方向に影響を受ける傾向にある。

P1 における最大/最小振幅比が最も大きい地震であった、2011/4/5 銚子市付近の地震（M 4.6，震央距離 15 km，地震波到来方向 102° ）の地震動記録の方位ごとの SBSR を図 2-12 に示す。この地震では P1 におけるピーク周波数が 0.7 Hz 付近と 1 Hz 付近に分離しており、地震動記録の方位によっては 0.7 Hz のピーク振幅が大きく下がることにより最大/最小振幅比が大きくなっている。このことから、ピーク周波数の変化の有無も最大/最小振幅比に反映されていることが考えられる。

最大/最小振幅比と入射角および地震波到来方向との関係は、ともに明瞭な相関は見られなかったが、地震波到来方向との関係では各ピークで共通して 90° 近辺において最大/最小振幅比の増加傾向が見られた。

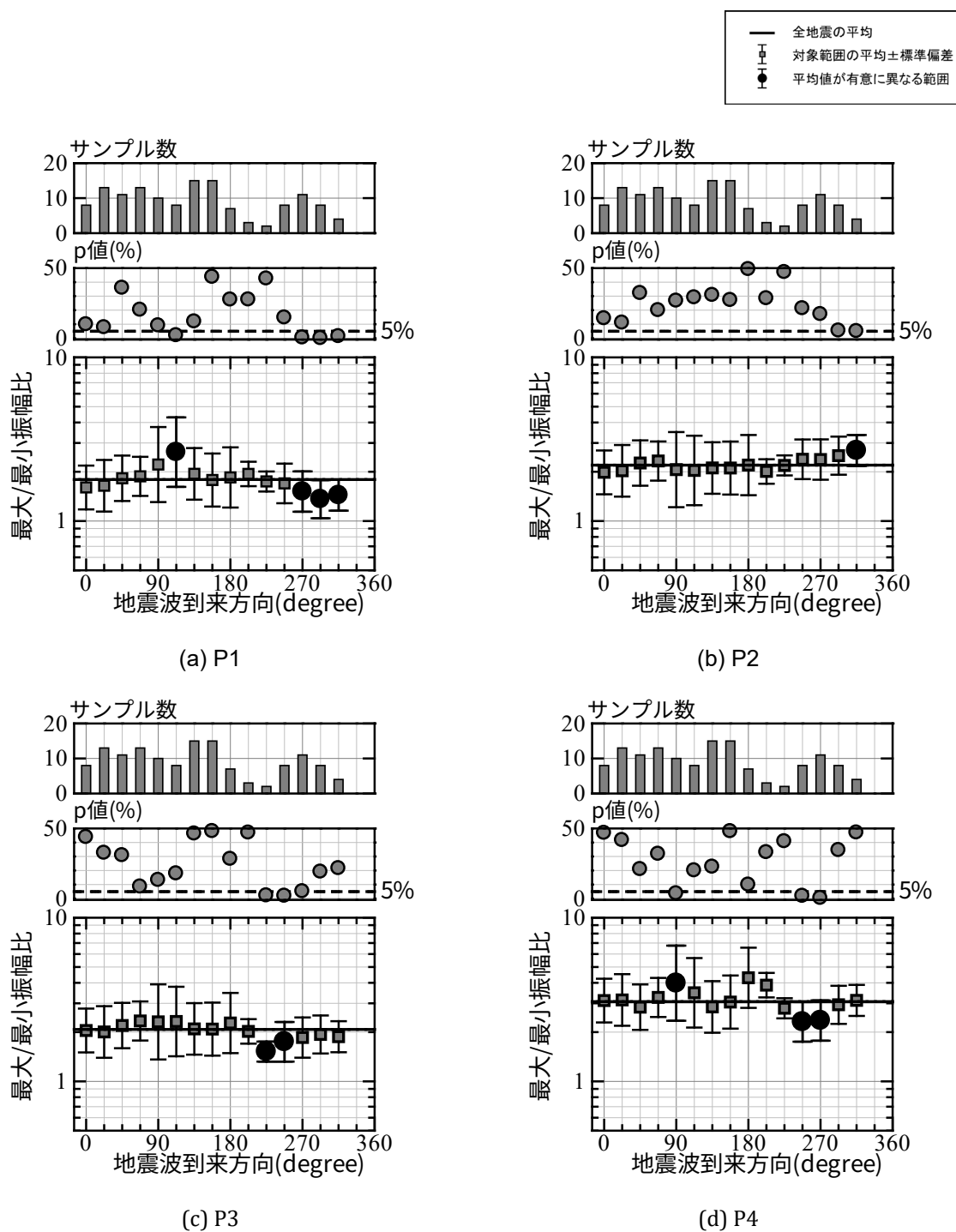


図 2-11 記録方位によるSBSRの変動（最大/最小振幅比）と地震波到来方向の関係

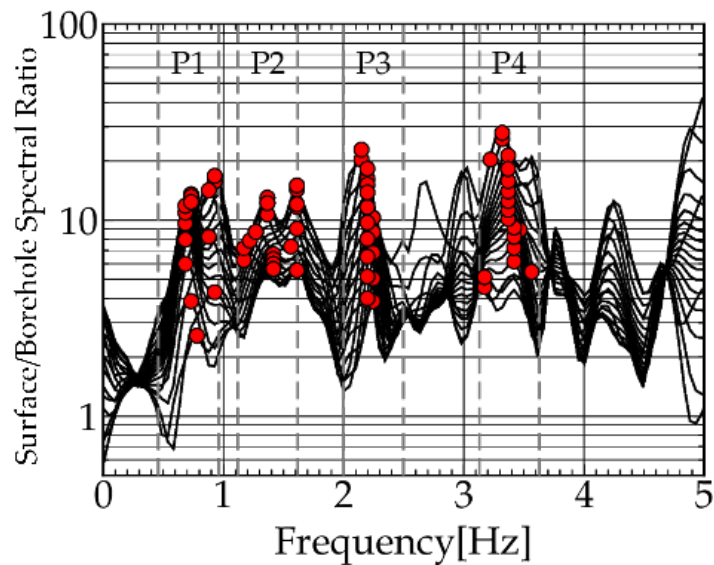


図 2-12 2011/4/5 銚子市付近の地震におけるSBSRのピーク変動

2.3.4 直達 S 波とコーダ波の比較

前節の検討では，大局的な傾向を把握するため観測記録の全長を用いた分析を実施したが，本節では S 波とコーダ波を分離した検討を実施し，直達波と十分に散乱した波で傾向の違いがあるかを確認した。

S 波の継続時間は，内山・山本(2016)^[2-15]を参考に，表 2-3 に示す通りマグニチュードに応じて設定した。またコーダ波は，S 波切り出しの終了後から 40 秒間の波形を用いた。図 2-13 に，各ピークにおける S 波部とコーダ部の最大/最小振幅比と地震波到来方向との関係を示す。P1, P3, P4 については，S 波部の最大/最小振幅比は，記録全長での最大/最小振幅比と同様の傾向が見られ，到来方向 90° 近辺での増加傾向は，より強調する形で表れている。ただし P2 については，到来方向 90° 近辺での最大/最小振幅比が減少し，代わりに 30° 近辺での最大/最小振幅比が大きくなる傾向が見られた。一方コーダ部は，全体的に S 波部よりも最大/最小振幅比が小さく，90° 近辺での最大/最小振幅比の増加傾向が見られない。震源に依存しない安定した地盤増幅特性を評価する手法としてコーダ波の SBSR を使用する例^[2-16]もあり，本結果でも震源依存性の低い傾向が見られた。このことからピークの変動には S 波が大きく影響しており，コーダ部に含まれる散乱波や表面波の影響によって SBSR の水平成分の変動は減少することが考えられる。

表 2-3 観測記録のS波切り出し時間

M	継続時間 (秒)	M	継続時間 (秒)
~4.5	5	~6.5	20
~5.0	7.5	~7.0	30
~5.5	10	~7.5	40
~6.0	15	7.5~	60

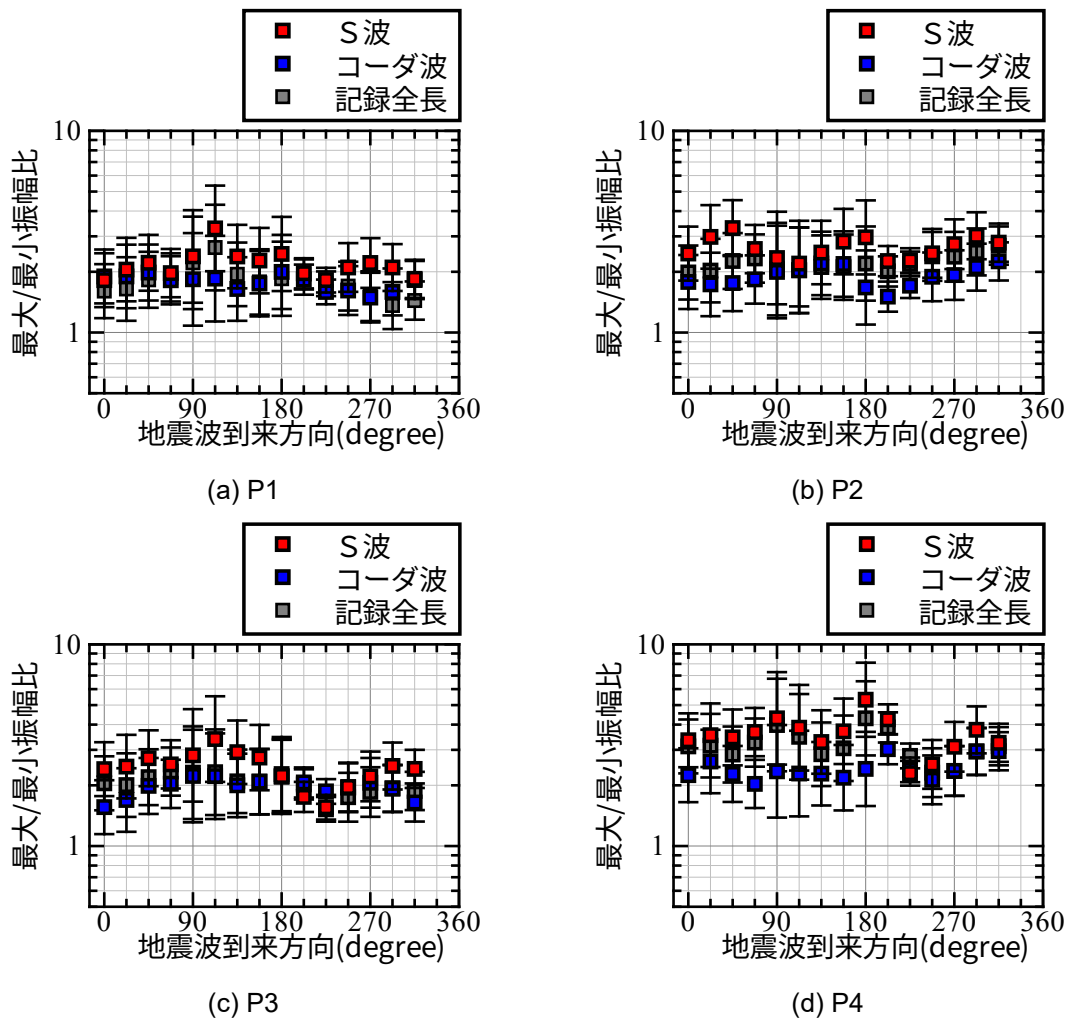


図 2-13 S波およびコーダ波のSBSR変動と地震波到来方向の関係

2.3.5 SBSR の方位依存性

前節の検討で、SBSR の変動が地震波到来方向に影響を受けることを示した。本節では、その要因の一つとして考えられる地震動記録にみられる方位依存性について検討する。

Matsushima et al. (2017)^[2-17]では、不整形地盤上での微動 H/V スペクトル比 (MHVR) が方位依存性を有しており、盆地形状の端部に並行する振動方向の MHVR が大きくなることを指摘している。また、長尾他(2012)^[2-18]では、MHVR のピーク振幅は、地震波 H/V スペクトル比のピーク振幅とよく一致しており、実体波の重複反射による影響が支配的であることを示唆している。これらの検討から、地震動記録の水平成分スペクトルの変動は不整形地盤に起因していることが考えられる。図 2-5 に示すように、CHBH14 観測点周辺では南北方向の断面において地盤の不整形性が確認できる。本検討でも MHVR の方位依存性と同一メカニズムにより、SBSR の変動が生じている可能性がある。

また、Takagi and Okada (2012)^[2-19]では、鉛直アレイにおける地表記録と地中記録の相互相関関数から、地震動記録の方位による S 波到達時間差を算出し、LSPD (Leading Shear-wave Polarization Direction) と呼ばれる S 波の伝播速度が最も速い方向を評価している。CHBH14 観測点においては

LSPD が 165.5° と推定されている。SBSR と相互相関関数はフーリエ対の関係にあり、相互相関関数に現れる地震動記録の方位による S 波の伝播速度の差は、SBSR ではピーク周波数の差として現れることが考えられる。このことから、図 2-12 の P1 で見られるピーク周波数の分離は、S 波の到達時間差によって生じたものである可能性が示唆される。Takagi and Okada (2012)^[2-19]では、S 波到達時間の異方性の要因を弾性体内に存在するクラックによって生じる S 波スプリッティングにより説明しており、等方弾性体仮定からの乖離を意味する。

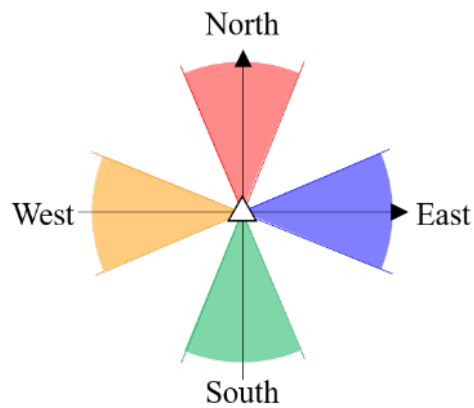
本検討における SBSR の変動は、既往研究における検討と同様の現象が反映された結果であると考えられるが、これらの検討では波動の到来方向との関連性は議論されていない。本節では、地震波到来方向別に平均した SBSR を確認することで、方位依存性の影響がみられるかを検討した。

図 2-14(a)に示すように各到来方向の 45° ($\pm 22.5^\circ$) の範囲に該当する地震を平均の対象とした。図 2-14(b)~(e)に各到来方向別の S 波部における平均 SBSR を示す。SBSR の方位による違いを確認するため、Transverse 成分、Radial 成分、NS 成分、EW 成分それぞれの平均 SBSR を、前節までと同条件で計算した。

まず、SH 波と SV 波に相当する、Transverse 成分と Radial 成分について議論する。P1 においては、到来方向による差異はあまり見られず、安定したピークが見られる。P2 においても比較的安定しているが、Radial 成分においては到来方向によってピーク周波数に違いがあり、東方および西方から到来する地震に関しては 1.2 Hz 付近に、南方から到来する地震に関しては 1.5 Hz 付近にピークが現れる。北方から到来する地震はその中心の 1.35 Hz 付近でピークを持っており、図 2-7 に示した P2 の周波数と同じとなっている。P3~P4 では、東西方向のペア、南北方向のペアでそれぞれ同じ傾向を示しており、東西と南北の間では振幅やピーク周波数が異なる結果となっている。

NS 成分と EW 成分の到来方向別平均 SBSR を見ると、到来方向に関わらずそれぞれ同様の傾向を示している。NS 成分と EW 成分の間では振幅やピーク周波数の違いはあるため、SBSR の方位による違いは不整形などの多次元的な地盤構造が影響しており、特に高周波数帯のピークにおいてその影響は強くなっていると考えられる。澤田ほか(1994)^[2-20]では、波状の層境界をもつ地盤モデルについて SH 入射波に対する理論伝達関数を求めており、水平成層近似をした地盤の理論伝達関数のピークが堆積層の最も薄い部分と最も厚い部分の 1 次元解析における卓越周期に分離して現れることを示した。図 2-14(c)の P2 に表れるピークの変動など、本検討結果でも同様の傾向が見てとれる。

以上のことから、ピーク周波数および振幅値の違いは、不整形性の影響度を評価する上での手がかりとなる可能性がある。



(a) 到来方向別平均の
対象範囲

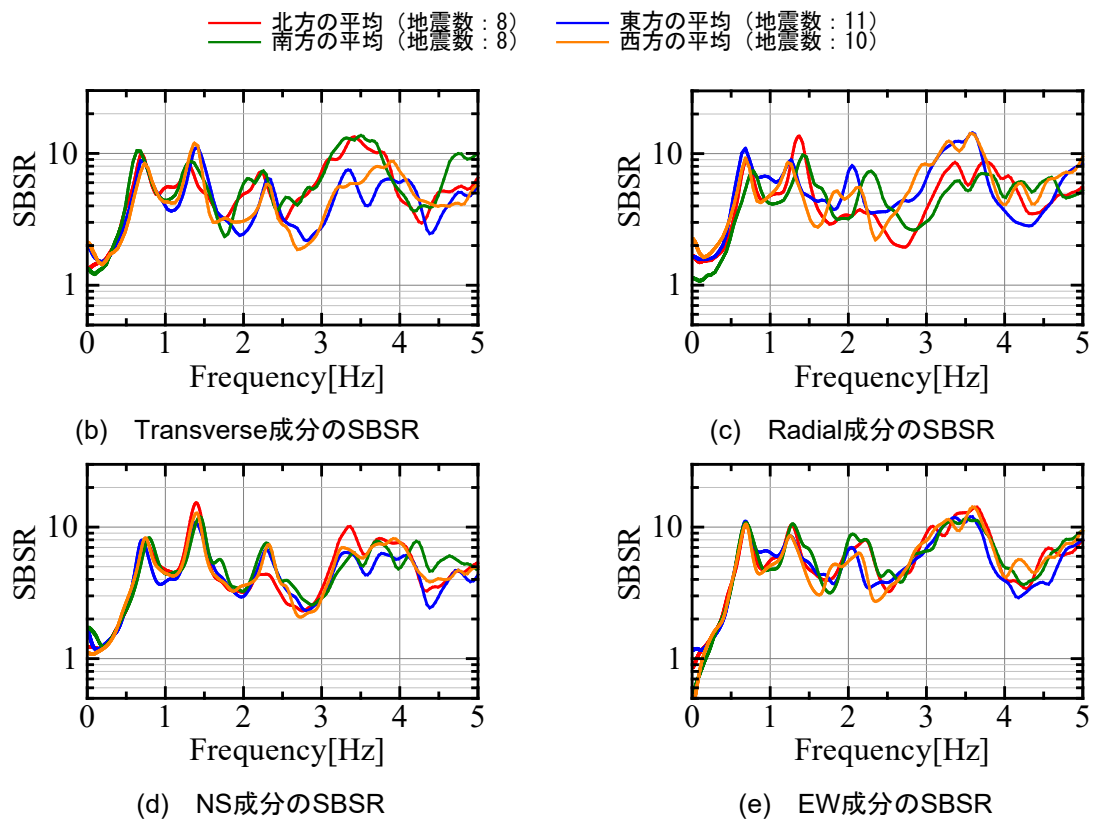


図 2-14 到来方向別のS波部平均SBSR

2.4 全 KiK-net 観測点を対象とした方位依存性の統計的検証

2.4.1 SBSR の 1 次ピークの抽出と変動解析

CHBH14 観測点で見られた方位依存性がサイト固有の特殊な事例であるか、あるいは一般的に見られる現象であるかを検証するため、再び全 KiK-net 観測点（約 700 地点）を対象とした統計的分析を行った。ここでは、各観測点の地盤特性を最も端的に表す指標として、SBSR の基本モードに対応する 1 次ピークに着目した。しかし、観測スペクトルは形状が複雑であり、単純な最大値法ではノイズや高次モードを誤検出する恐れがある。そこで本検討では、ガウス混合モデルを用いたクラスタリング手法を適用した。各観測点の全イベントの Transverse 成分 SBSR のピークの集合に対し、周波数方向の分布を複数のガウス分布の重ね合わせとしてモデル化し、最も低周波数側に現れるクラスタを分析対象のピーククラスタとして抽出した。カテゴリ数は、観測点ごとに抽出したピーク数/全地震数として、1 地震あたりの平均ピーク数とした。なお、ガウス混合モデルによるクラスタリングは Python ライブラリである `scikit-learn`^[2-21]を使用した。MYGH13 観測点において、ピークの集合に対してクラスタリングした例を図 2-15 に示す。

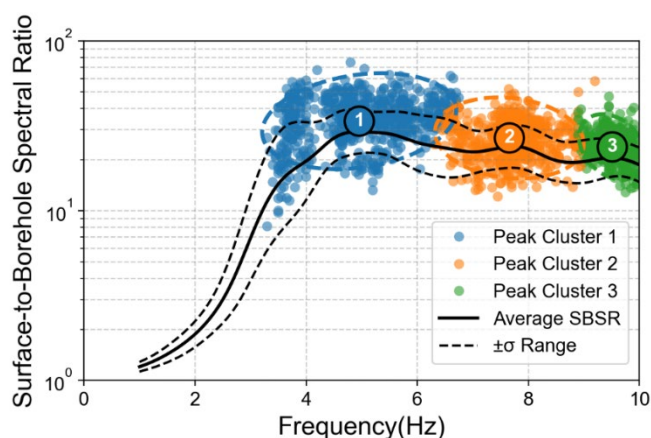


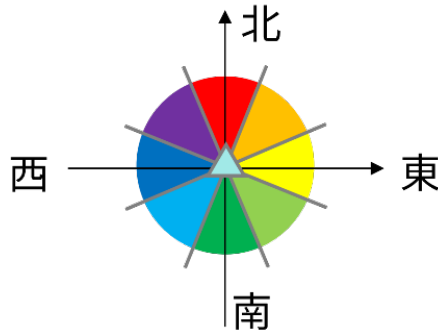
図 2-15 ガウス混合分布によるピークのクラスタリング
MYGH13 観測点の例

2.4.2 MANOVA による変動要因の影響度評価

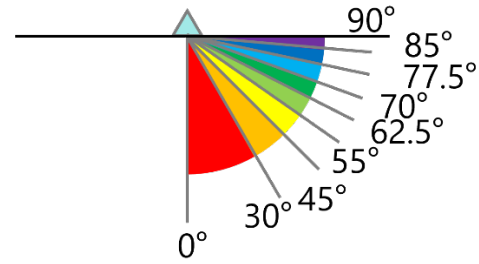
前節で抽出した 1 次ピーククラスタに見られる変動に対し、見かけの入射角と到来方向のどちらが支配的な影響を与えているかを定量的に評価するため、一元配置多変量分散分析（Multivariate Analysis of Variance; MANOVA）を適用した。MANOVA は Python ライブラリの `statsmodels`^[2-22]を使用して実施した。解析対象は、データベースのうち全方位のイベントが含まれ、かつ十分なイベント数が確保された 303 地点とした。統計モデルにおいては、従属変数ベクトルとして SBSR のピーク特性（対数振幅・周波数）を設定し、独立変数（因子）として従来の 1 次元波動論で重要視される見かけの入射角と、本研究が着目する到来方向の 2 つを設定し、以下のようにカテゴリ化した。模式図を図 2-16 に示す。

到来方向：北を起点として時計回りに 45° ピッチで分割した 8 方位 ($0 \pm 22.5^\circ$, $45 \pm 22.5^\circ$, $90 \pm 22.5^\circ$, $135 \pm 22.5^\circ$, $180 \pm 22.5^\circ$, $225 \pm 22.5^\circ$, $270 \pm 22.5^\circ$, $315 \pm 22.5^\circ$) のグループに分けた。

見かけの入射角：入射角のヒストグラムを考慮し、 $0-30^\circ$, $30-45^\circ$, $45-55^\circ$, $55-65^\circ$, $65-72.5^\circ$, $72.5-77.5^\circ$, $77.5-85^\circ$, $85-90^\circ$ の 8 グループに分けた。



(a) 到来方向のグループ分け



(b) 到来方向のグループ分け

図 2-16 グループ分けの模式図

各因子の影響度を比較するための指標として、Pillai's Trace を採用した。Pillai's Trace(V)は、分散分析における群間変動と全変動の比に基づく統計量であり、その値が大きいほど、当該因子が従属変数の変動に対して強い説明力を持つことを意味する。以下の式のように、固有値の和に基づく指標であり、分散共分散行列の等質性が満たされない場合でも頑健性が高い指標であることから採用した^[2-23]。

$$V = \text{tr}(\mathbf{H}(\mathbf{H} + \mathbf{E})^{-1})$$

$$= \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{1 + \lambda_j} \quad \text{式 (2-3)}$$

ここで、 $\mathbf{H}$ はグループ間の違いを表す行列で、群間平方和を多次元に拡張したものである。 $\mathbf{E}$ は誤差を表す行列で、各グループ内部での個々のデータのばらつきを示す。 λ_j は $\mathbf{H}\mathbf{E}^{-1}$ の固有値を示す。なお、 $\mathbf{H}$ および $\mathbf{E}$ は以下の式のように定義される。

$$\mathbf{H} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{\mathbf{y}}_j - \bar{\mathbf{y}})(\bar{\mathbf{y}}_j - \bar{\mathbf{y}})^T \quad \text{式 (2-4)}$$

$$\mathbf{E} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\mathbf{y}_{ij} - \bar{\mathbf{y}}_j)(\mathbf{y}_{ij} - \bar{\mathbf{y}}_j)^T \quad \text{式 (2-5)}$$

ここで、 n_j はグループ j のサンプルサイズ、 $\bar{\mathbf{y}}_j$ はグループ j における従属変数の平均ベクトル、 $\bar{\mathbf{y}}$ は全データの従属変数の全体平均ベクトル、 $\mathbf{y}_{ij}$ はグループ j に属する i 番目のデータの個別の値を表す。

本検討では、各観測点において到来方向と入射角それぞれの Pillai's Trace を算出し、その大小関係を比較することで、どちらの要因が SBSR の変動に対して優位であるかを判定した。

図 2-17 に両パラメータの Pillai's Trace を比較した図を示す。解析の結果、対象とした全観測点の約 87%において、到来方向の Pillai's Trace が入射角のそれを上回ることが確認された。物理的な観点からは、地盤に不整形等が存在する場合、地震波の伝播経路は到来方向だけでなく入射角によっても変化するため、双方が SBSR の変動に寄与し得ると考えられる。しかし本解析の結果は、現実の観測記録に見られる SBSR のばらつきに対しては、入射角の違いよりも到来方向の違いの方がより鋭敏に反映され、支配的な影響を及ぼしていることを示している。従来の 1 次元解析で重視されてきた鉛直入射仮定の妥当性よりも、複雑な波動場に起因する方位依存性を考慮することの方が、サイト特性の評価精度向上において効果的であることを示唆している。

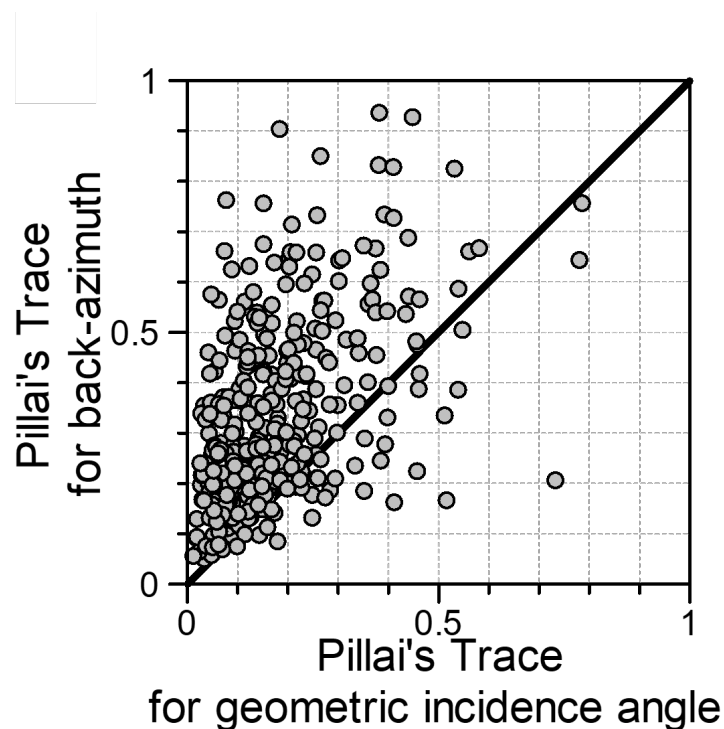


図 2-17 見かけの入射角と到来方向のピークの変動に対する影響度 (Pillai's Trace) の比較

2.5 まとめ

本章では, KiK-net 強震観測記録を用いた統計分析および KiK-net 銚子中観測点を対象とした観測記録の分析により, 以下の知見が得られた。

線形範囲内のばらつき

Transverse 成分を用いた統計分析により, 50 cm/s^2 以下の線形範囲内であっても, SBSR は震源距離やマグニチュード等の物理パラメータでは説明できない大きなばらつきを持つことが確認された。

不整形地盤における方位依存性

特定観測点 (CHBH14) の詳細解析において, 直達 S 波部分には強い方位依存性が見られる一方, 散乱波が卓越するコーダ波部分では等方的な応答に近いことが確認された。これにより, 観測された変動の実態が震源特性ではなくサイト近傍の不整形構造に起因する方位依存性であることが物理的に裏付けられた。

現象の一般性と支配要因

全観測点を対象とした MANOVA 解析により, SBSR の変動要因としては, 入射角よりも到来方向の影響が圧倒的に支配的であることが統計的に示された。

以上の結果は, 地盤震動評価において, 震源・パス特性とは独立したサイト固有の方位特性を考慮する必要性を裏付けるものである。次章では, この知見に基づき, SBSR の変動からサイト固有の方位依存性を分離・抽出する新たな解析手法を提案する。

第2章の参考文献

- [2-1]Kramer S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall.
- [2-2]Thompson, E. M., Baise, L. G., Tanaka, Y., & Kayen, R. E. (2012). A taxonomy of site response complexity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 32-43. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.04.005.
- [2-3]Kawase, H. (1996). The cause of the damage belt in Kobe: “The basin-edge effect,” constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves. *Seismological Research Letters*, 67(5), 25-34. doi:10.1785/gssrl.67.5.25.
- [2-4]Rodriguez-Marek, A., Rathje, E. M., Bommer, J. J., Scherbaum, F., & Stafford, P. J. (2014). Application of single-station sigma and site-response characterization in a probabilistic seismic-hazard analysis for a new nuclear site. *Bull Seismol Soc Am*, 104(4), 1601-1619. doi:10.1785/0120130196.
- [2-5]National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.
- [2-6]野口科子, 笹谷努(2011) 2003 年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響. 地震 第2輯, 63 巻, 3 号, 165-187. doi:10.4294/zisin.63.165.
- [2-7]上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生(2002) 気象庁の震源決定手法の改善－浅部速度構造と重み関数の改良－. 験震時報, 65, pp.123-134.
- [2-8]気象庁, 地震月報 (カタログ編), <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html> (2024-7-30 参照).
- [2-9]汐見勝彦(2012) 防災科研 Hi-net 地中地震計設置方位情報推定方法の改良, 防災科学技術研究所研究報告, 80, 1-20.
- [2-10]Abrahamson, N. A., & Hollenback, J. C. (2012). Application of single-station sigma ground motion prediction equations in practice. In Proceedings of the 15th world conference on earthquake engineering, Lisbon, Portugal.
- [2-11]千葉県総務部デジタル改革推進局デジタル推進課, ちば情報マップ, <https://map.pref.chiba.lg.jp/pref-chiba/Portal> (参照 2023-7-28).
- [2-12]太田裕, 後藤典俊(1976) S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探鉱, 第29巻, 第4号, pp.31-41.
- [2-13]藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 早川譲, 遠山信彦, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 劉瑛(2009) 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, Vol. 337.
- [2-14]仲野健一, 川瀬博, 松島信一(2015) スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2 分離した特性に対する詳細分析, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号, pp.38-59. doi:10.5610/jaee.15.1.38.
- [2-15]内山泰生, 山本優(2016) スペクトルインバージョン解析に基づく2016年熊本地震の震源・伝播経路特性の評価, 地震工学会論文集, 第16巻, 第10号, 146-150. doi:10.5610/jaee.16.10.146.

- [2-16]Sawazaki, K., Sato, H., Nakahara, H., & Nishimura, T. (2006). Temporal change in site response caused by earthquake strong motion as revealed from coda spectral ratio measurement. *Geophysical Research Letters*, 33(21). doi:10.1029/2006GL027938.
- [2-17]Matsushima, S., Kosaka, H., & Kawase, H. (2017). Directionally dependent horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors at Onahama, Fukushima, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 96. doi:10.1186/s40623-017-0680-9.
- [2-18]長尾毅, 山田雅行, 野津厚(2012) 常時微動 H/V スペクトルを構成する波動成分に関する一解釈, 土木学会論文集, Vol. 68, No. 1, 48-62. doi:10.2208/jscejsee.68.48.
- [2-19]Takagi, R., & Okada, T. (2012). Temporal change in shear velocity and polarization anisotropy related to the 2011 M9. 0 Tohoku-Oki earthquake examined using KiK-net vertical array data. *Geophysical Research Letters*, 39(9). doi:10.1029/2012GL051342.
- [2-20]澤田純男, 土岐憲三, 福井基史(1994) 地層境界で発生する散乱波を考慮した地盤震動解析, 京都大学防災研究所年報, No. 37, B-2, 15-33.
- [2-21]Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
- [2-22]Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: econometric and statistical modeling with python. *SciPy*, 7(1), 92-96.
- [2-23]Hair, J., F., Black, W., C., Babin, B., & Anderson, R., E. (2018). *Multivariate data analysis*, Eighth Edition. Cengage Learning EMEA.

第3章 二重スペクトル比法に基づく変動要因の検証

3.1 概要

第2章の観測記録による方位依存性の分析において、観測された地表/地中スペクトル比（Surface-to-Borehole Ratio; SBSR）のばらつきは、主に地震波の到来方向に支配されていることが示された。従来の地震動予測モデル（Ground Motion Model; GMM）において予測不可能な偶然的な不確実性として処理されてきたばらつき成分の中に、サイト固有の地下構造に起因する系統的な方位依存性が含まれていることを示唆するものである。しかし、単一の観測記録に含まれるスペクトル変動には、サイト特性だけでなく、震源の発震機構や伝播経路の不均質性による影響が混在している。したがって、観測された方位依存性が純粋にサイト近傍の不整形構造に起因するものであると判断するためには、震源および経路の影響を物理的に分離する必要がある。本章では、これら2つの効果を定量的に分離・評価するための手法として、二重スペクトル比法（Twofold Spectral Ratio; TSR）の枠組みを応用した手法を提案する。本手法は、本来Q値推定のために開発されたTSR法を、サイト特性のばらつきの抽出に適用する試みである。本章の目的は、TSR法の理論的枠組みを再定義し、実際のKiK-netデータへの適用を通じて、SBSRのばらつきを大局的なパス効果と局所的なサイト効果に定量的に分離することにある。

3.2 分析手法

3.2.1 二重スペクトル比法の理論的背景

TSR法は、観測された地震動スペクトルから震源およびサイト増幅特性を系統的にキャンセルすることで、伝播経路に依存する特性、特に非弾性減衰（Q値）を推定するために確立された手法である[3-1]。松澤他(2004)[3-2]および泉谷(2000)[3-3]は、近接する2つの観測点(i, j)と2つの地震イベント(m, n)のスペクトル比を組み合わせることで、震源・サイト項を除去し、経路項のみを抽出する枠組みを提示した。TSR法の模式図を図3-1に示す

観測される地震動のフーリエスペクトルは、通常、周波数領域において震源・伝播経路・サイト特性の積としてモデル化される。点震源および遠方場近似を仮定すると、観測点*i*において地震イベント*m*が観測されたときの地表地震動のフーリエスペクトル($F_{m,i}(f)$)は、次式で定義される。

$$\begin{aligned} F_{m,i}(f) &= \bar{S}_{m,i}(f) \cdot \bar{P}_{m,i}(f) \cdot \bar{G}_i(f) \\ \bar{S}_{m,i}(f) &= R_{m,i} S_m(f) \\ \bar{P}_{m,i}(f) &= r_{m,i}^{-n} \exp\left(-\pi f \int_{Path} \frac{1}{VsQs(f)} dr_{m,i}\right) \\ \bar{G}_i(f) &= G_i(f) I_i(f) C_f \end{aligned} \quad \text{式 (3-1)}$$

ここで、 $\bar{S}_{m,i}$ は震源特性、 $\bar{P}_{m,i}$ は伝播経路特性、 $\bar{G}_i$ はサイト特性を表す。また、 $R_{m,i}$ は放射特性、 $S_m(f)$ は震源スペクトル、 $r_{m,i}$ は震源距離、 n は幾何減衰係数、 $G_i(f)$ は地震基盤からの増幅率、 $I_i(f)$ は機器の

計器特性、 C_f は自由表面効果を表す。積分項は非弾性減衰に関する項で、 Vs と Qs はそれぞれ伝播経路に沿ってのS波速度と Qs 値である。泉谷(2000)^[3-3]ではこの積分項をまとめて $t_{m,i}^*$ と表現している。 $r_{m,i}/Vs$ から、 Qs の媒質を通った時間を合計した時間(走時)と解釈できる。

図 3-1 のように、2つの観測点と2つの地震の組み合わせを考える。これら4つの観測記録のスペクトル比(二重スペクトル比、 $TSR(f)$)を取り、震源特性とサイト特性を相殺することで伝播経路特性を抽出する。

$$TSR(f) = \frac{F_{m,i}(f)/F_{m,j}(f)}{F_{n,i}(f)/F_{n,j}(f)} = \frac{R_{m,i}R_{n,j}}{R_{m,j}R_{n,i}} \left(\frac{r_{m,i}r_{n,j}}{r_{m,j}r_{n,i}} \right)^{-n} \cdot \exp(-\pi f \Delta t^*) \quad \text{式 (3-2)}$$

ここで、 Δt^* は4つのパスの二重走時差と呼ばれるパラメータであり、以下の通り定義される。

$$\Delta t^* = (t_{m,i}^* - t_{m,j}^*) - (t_{n,i}^* - t_{n,j}^*) \approx \frac{(T_{m,i} - T_{m,j}) - (T_{n,i} - T_{n,j})}{Qs} \quad \text{式 (3-3)}$$

ここで $T_{m,i}$ は震源 m から観測点 i までの走時である。

式 (3-2) でキャンセルされている項は、震源スペクトル $S_m(f)$ およびサイト特性 $\bar{G}_i(f)$ である。これらは、地震イベントが異なっても放射特性を考慮しない震源スペクトルは再現性があること、地震イベントが異なってもサイト特性は再現性があることを仮定していることと同義である。これらの仮定が適用できる地震ペア・観測点ペアを選定した際、二重スペクトル比の対数振幅が Δt^* に対して線形に変化することを示しており、その傾きが、二重走時差が生じる領域の平均的な非弾性減衰であるとして $\overline{Qs}$ を推定している。松澤他(2003)^[3-2]では、式 (3-2) のうち、放射特性および幾何減衰項の補正も行い、補正二重スペクトル比(CTSR)を使用している。泉谷(2000)^[3-3]では、震源に関わる項は暗黙の裡に2地震間で共通とし、伝播経路による減衰の違いを伝播距離の差に押し付けていることに着目した検討をしている。この際、理論式と観測値の残差は、 Q 値推定の誤差あるいはモデル化しきれないノイズとして処理されることが一般的であった。

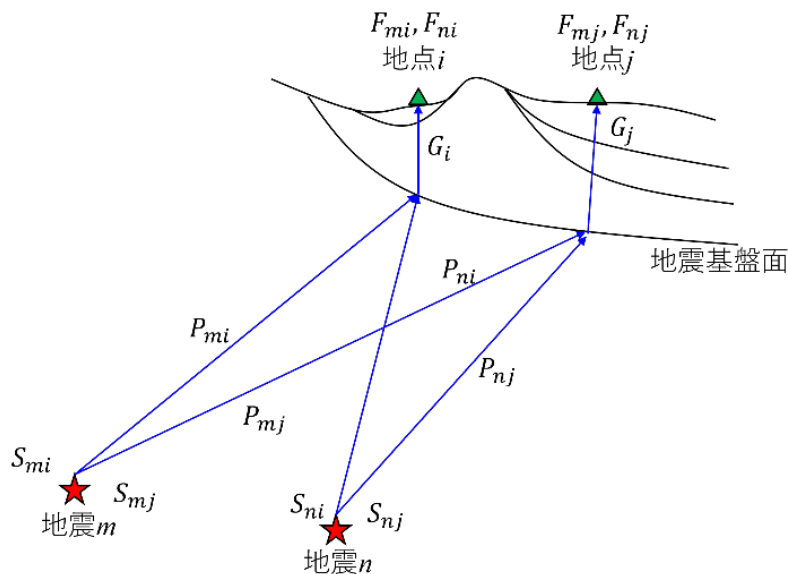


図 3-1 二重スペクトル比の模式図

3.2.2 二重スペクトル比法に基づく SBSR ばらつきの分離手法

本研究では、この TSR 法の枠組みを応用し、震源・伝播経路特性に起因する大局的要因と、SBSR に現れるサイト固有の局所要因に分離する手法を提案する。本節では、本手法の妥当性を支える物理的仮説と、それに基づく具体的な検証手順について述べる。

まず、図 3-2 に本手法の模式図を示す。第 2 章で示した通り、SBSR は地震イベントによって変動する傾向がみられることから、SBSR が地震ごとに異なる枠組みを用意する。SBSR は従来、地表地震記録と地中地震記録のフーリエスペクトル比をとることにより、共通となる震源・伝播経路特性がキャンセルされ地表－地中間の経験的伝達関数として評価される指標である。下式によって表現される。

$$\begin{aligned} SBSR_{m,i}(f) &= \frac{F_{m,i}^S(f)}{F_{m,i}^B(f)} = \frac{G_{m,i}^S(f)}{G_{m,i}^B(f)} \\ F_{m,i}^S(f) &= \bar{S}_{m,i}(f) \cdot \bar{P}_{m,i}(f) \cdot G_{m,i}^S(f) \\ F_{m,i}^B(f) &= \bar{S}_{m,i}(f) \cdot \bar{P}_{m,i}(f) \cdot G_{m,i}^B(f) \end{aligned} \quad \text{式 (3-4)}$$

ここで、上添え字の S は地表記録、 B は地中記録に関する表記である。

SBSR の方位による変動が、震源・伝播経路特性に起因する場合、地表地震記録と地中地震記録の間で、これらが共有されていないことを意味する。そこで、SBSR の地震間の変動を、下式のように再定義する必要がある。

$$\begin{aligned} \frac{SBSR_{m,i}(f)}{SBSR_{n,i}(f)} &= \frac{F_{m,i}^S(f)/F_{m,i}^B(f)}{F_{n,i}^S(f)/F_{n,i}^B(f)} = \Delta G_{mn,i}(f) \times \varepsilon_{mn,i}^{SP}(f) \\ \Delta G_{mn,i}(f) &= \frac{G_{m,i}^S(f)/G_{m,i}^B(f)}{G_{n,i}^S(f)/G_{n,i}^B(f)} \end{aligned} \quad \text{式 (3-5)}$$

ここで、 $\varepsilon_{mn,i}^{SP}$ は SBSR で相殺しきれなかった震源・伝播経路特性の残差を表す。式 (3-1) に当てはめると、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{mn,i}^{SP}(f) &= \frac{\bar{S}_{m,i}^S(f) \cdot \bar{P}_{m,i}^S(f) / \bar{S}_{m,i}^B(f) \cdot \bar{P}_{m,i}^B(f)}{\bar{S}_{n,i}^S(f) \cdot \bar{P}_{n,i}^S(f) / \bar{S}_{n,i}^B(f) \cdot \bar{P}_{n,i}^B(f)} \\ &= \frac{R_{m,i}^S R_{n,i}^B \left(\frac{r_{m,i}^S r_{n,i}^B}{r_{m,i}^B r_{n,i}^S} \right)^{-n}}{R_{m,i}^B R_{n,i}^S \left(\frac{r_{m,i}^B r_{n,i}^S}{r_{m,i}^S r_{n,i}^B} \right)^{-n}} \\ &\quad \cdot \exp \left(-\pi f \left\{ \left(\frac{T_{m,i}^S}{Q_{S_{m,i}}^S(f)} - \frac{T_{m,i}^B}{Q_{S_{m,i}}^B(f)} \right) - \left(\frac{T_{n,i}^S}{Q_{S_{n,i}}^S(f)} - \frac{T_{n,i}^B}{Q_{S_{n,i}}^B(f)} \right) \right\} \right) \end{aligned} \quad \text{式 (3-6)}$$

震源スペクトルや放射特性、幾何減衰は、地表地震計と地中地震計の間で大きく乖離することは考えにくく、主に違いが現れるのは非弾性減衰であると考えられる。

一方で、TSR 法では、サイト特性が地震に依らず一定という仮定を置いている。これに、先ほどと同様サイト特性が地震ごとに異なるという前提を踏まえ、式 (3-2) を以下のように再定義する。

$$\begin{aligned} TSR_{mn,ij}^S(f) &= \Delta SP_{mn,ij}^S(f) \times \varepsilon_{mn,ij}^{GS}(f) \\ \Delta SP_{mn,ij}^S &= \frac{R_{m,i}^S R_{n,j}^S \left(\frac{r_{m,i}^S r_{n,j}^S}{r_{m,j}^S r_{n,i}^S} \right)^{-n}}{R_{m,j}^S R_{n,i}^S \left(\frac{r_{m,j}^S r_{n,i}^S}{r_{m,i}^S r_{n,j}^S} \right)^{-n}} \cdot \exp(-\pi f \Delta t^{S*}) \end{aligned} \quad \text{式 (3-7)}$$

ここで、 $\varepsilon_{mn,ij}^{GS}$ は TSR で相殺しきれなかったサイト特性の地震ごとの残差を表す。

本手法の仮説は、地表 TSR ($TSR_{mn,ij}^S$) と地中 TSR ($TSR_{mn,ij}^B$) が等しいとき、残ったばらつきを局所的なサイト特性の地震間変動に帰着させるものである。すなわち、以下の式で表される。

$$\frac{TSR_{mn,ij}^S(f)}{TSR_{mn,ij}^B(f)} = \frac{\varepsilon_{mn,ij}^{GS}(f)}{\varepsilon_{mn,ij}^{GB}(f)}$$

式 (3-8)

$$\text{such that } \frac{\Delta SP_{mn,ij}^S(f)}{\Delta SP_{mn,ij}^B(f)} = 1$$

ここで重要な点は、地表 TSR と地中 TSR の比は、算出手順上、地点*i*の SBSR 地震間変動と地点*j*の SBSR 地震間変動として書き表されることである。

$$\frac{TSR_{mn,ij}^S(f)}{TSR_{mn,ij}^B(f)} = \frac{\frac{F_{m,i}^S(f)/F_{n,j}^S(f)}{F_{m,j}^S(f)/F_{n,i}^S(f)}}{\frac{F_{m,i}^B(f)/F_{n,j}^B(f)}{F_{m,j}^B(f)/F_{n,i}^B(f)}}$$

式 (3-9)

$$= \frac{\frac{F_{m,i}^S(f)/F_{m,i}^B(f)}{F_{n,i}^S(f)/F_{n,i}^B(f)}}{\frac{F_{m,j}^S(f)/F_{m,j}^B(f)}{F_{n,j}^S(f)/F_{n,j}^B(f)}} = \frac{SBSR_{m,i}(f)/SBSR_{n,i}(f)}{SBSR_{m,j}(f)/SBSR_{n,j}(f)}$$

従来の TSR 法の、サイト特性が地震に依らず一定という仮定をした場合、残ったばらつきは大局的な震源・伝播経路特性に起因するものとして表される。

$$\frac{SBSR_{m,i}(f)/SBSR_{n,i}(f)}{SBSR_{m,j}(f)/SBSR_{n,j}(f)} = \frac{\varepsilon_{mn,i}^{SP}(f)}{\varepsilon_{mn,j}^{SP}(f)}$$

(3-10)

$$\text{such that } \frac{\Delta G_{mn,i}(f)}{\Delta G_{mn,j}(f)} = 1$$

式 (3-8)および(3-10)から、両手法の仮定の強さを比較することで、ばらつきの要因を大局的要因と局所的要因に分離する。具体的には、 $\Delta SP_{mn,ij}^S$ と $\Delta SP_{mn,ij}^B$ の相関 ρ_{SP} をとることで残差 ($\varepsilon_{mn,ij}^{GS}/\varepsilon_{mn,ij}^{GB}$) の局所的要因の影響の大きさを、そして $\Delta G_{mn,i}$ と $\Delta G_{mn,j}$ の相関 ρ_G を取ること残差 ($\varepsilon_{mn,i}^{SP}/\varepsilon_{mn,j}^{SP}$) の大局的要因の影響の大きさを評価する。ここで、相関係数の計算にはピアソンの相関係数を使用する。Anderson(2004)^[3-4]は、2つの波形の適合度を、相関の値に応じた4段階 (Excellent, Good, Fair, Poor) にランク付けしている。本検討ではこの値を参考にし、相関の強さを 1.0~0.7 を大、0.7~0.4 を中、0.4 以下を無として、表 3-1 のように整理する。

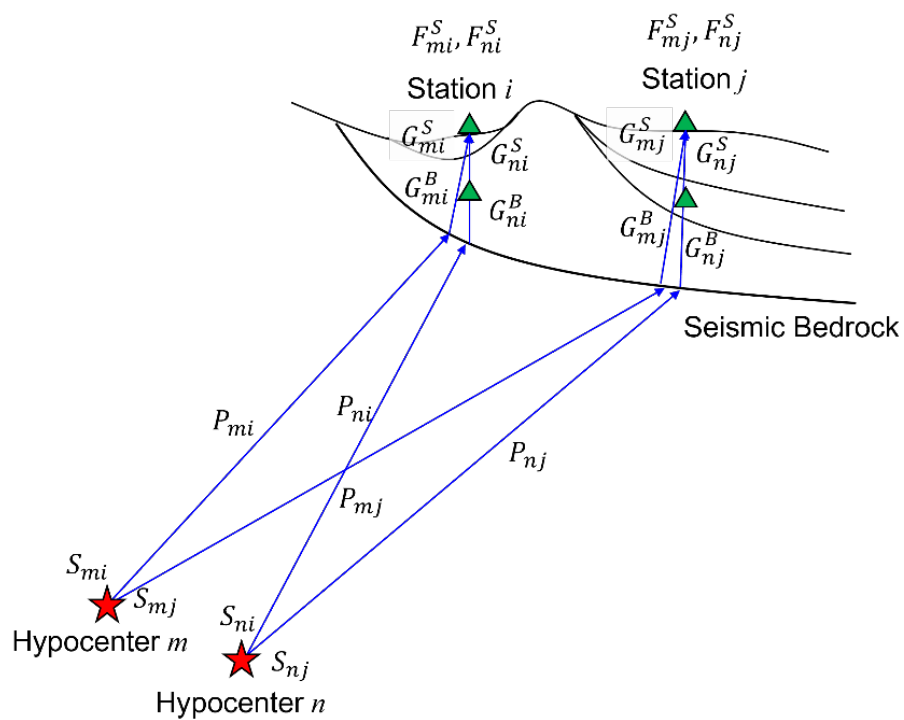


図 3-2 本手法の模式図

表 3-1 推定された相関係数の解釈

ρ_{SP} \ ρ_G	大 (>0.7)	中 (0.4-0.7)	無 (<0.4)
大 (>0.7) 分離精度：良	大局的要因	大局/局所的要因が 同程度	局所的要因
中 (0.4-0.7) 分離精度：中	要検討 個別の相関確認	要検討 個別の相関確認	局所的要因の可能性 あり
無 (<0.4) 分離精度：悪	分析対象外		

3.2.3 TSR および SBSR 変動の相関分析

前節で述べた空間相関に基づく検証を行うためには、互いに近接した位置にある KiK-net 観測点のペアを選定する必要がある。本分析では、パス効果の共通性とサイト効果の局所性を統計的に分離するため、観測点ペアおよび解析対象とする地震イベントの双方に対して以下の選定基準を設けた。

観測点ペア

- ・ 観測点間距離：水平離間距離が 20 km 未満であること。この距離設定は、統計解析に必要なペア数を確保しつつ、深部地殻構造などの広域的なパス効果が概ね共有される範囲として設定された実用的な閾値である。
- ・ データ数：後述する 2 つの地震データセットの双方において、共通して観測された地震イベントペアが 20 組以上存在すること。

以上の基準により、KiK-net 全観測網から計 293 ペアの観測点セットが抽出された（図 3-3）。

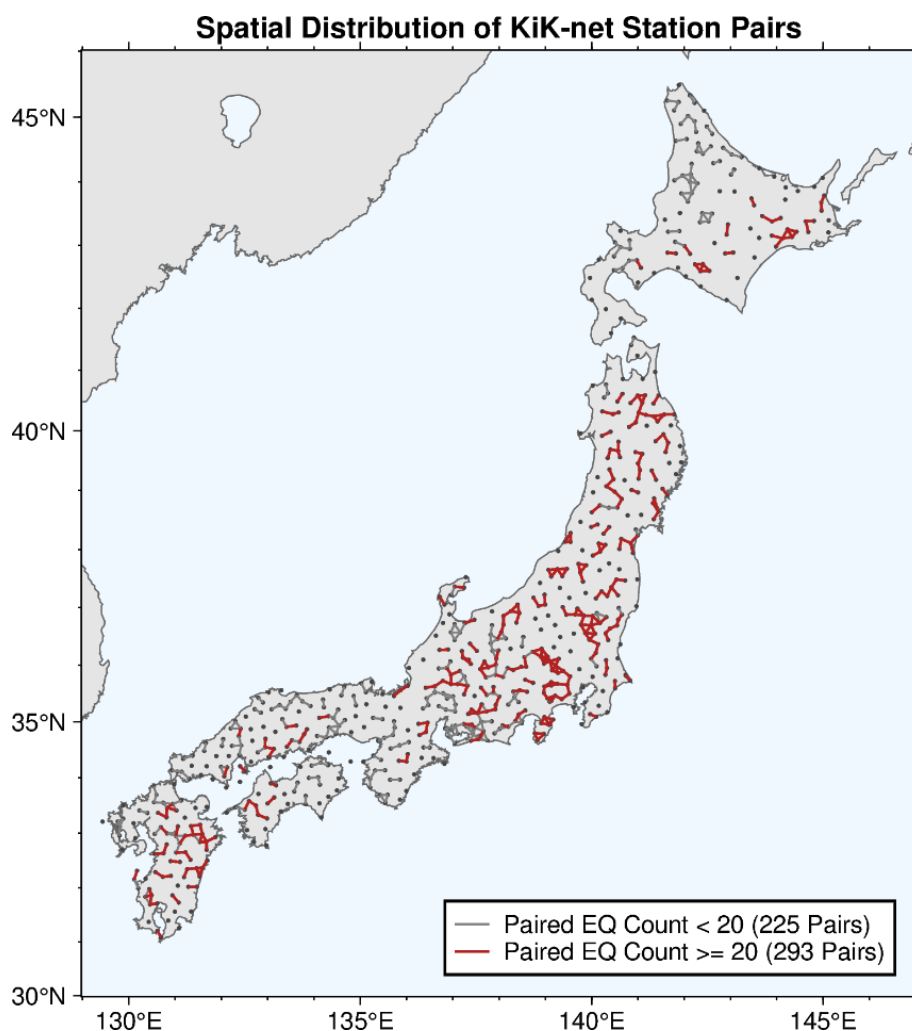


図 3-3 選定された観測点ペア

本検討では、第 2 章で構築したデータベースに基づき、以下の基準を満たす観測点ペアを解析対象として抽出した。変動要因を特定するため、同一の観測点ペアに対し、異なる物理条件を持つ 2 種類の地震ペアデータセット (Dataset A, B) を作成した。

Dataset A：同位置地震ペア

条件：震源間距離が 5 km 以下、到来方向の方位差が 5 度以内、かつ M_I 差が 0.2 以下。

目的：震源位置と伝播経路をほぼ完全に固定し、ごくわずかな入射波の差異に対するサイト応答の感度を検証する。

Dataset B：到来方向が異なる地震ペア

条件：震源距離の差が 10 km 以下、かつ到来方向の差が 45 度以上、かつ M_I 差が 0.2 以下。

目的：震源距離（幾何減衰）は同程度だが、伝播経路（Q 値など）が大きく異なるイベントを比較し、TSR 法がその経路差を正しく分離できるかを検証する。

3.3 大局的効果と局所的効果の相関分析結果

293 観測点ペアに対し、Dataset A, B を用いて、相関分析を実施した結果を示す。図 3-4 が Dataset A に対する結果、図 3-5 が Dataset B に対する結果で、下図は地表 TSR と地中 TSR の相関、上図は SBSR の変動の空間相関をそれぞれ示す。相関係数はピアソンの相関係数であり、周波数ごとに算出している。

地表 TSR と地中 TSR の相関 (ρ_{SP})

それぞれ下図に地表 TSR と地中 TSR の相関係数 ρ_{SP} を示す。中央値を示す赤実線を見ると、Dataset A, B とともに 1~10 Hz の帯域で中程度以上の正の相関が確認された。これは、地中記録が下降波等の影響を受けているにもかかわらず、TSR 法によって共通のパス項が地表・地中双方で適切に分離・抽出されていることを示唆している。すなわち、本分析手法の前提条件（パス項の分離）が適切に満たされていることが確認され、SBSR の空間相関 (ρ_G) を確認することが物理的に妥当であることが示される。

サイト固有変動の空間相関 (ρ_G)

それぞれ上図に近接観測点間における SBSR の地震間変動の相関係数 ρ_G を示す。中央値を示す青実線を見ると、Dataset A, B とともに、相関係数の中央値は全周波数帯域（1~10 Hz）において相関が無の範囲（IQR も狭い範囲）に留まった。もし SBSR の方位依存性が広域的なパス効果に起因するのであれば、近接観測点間では大きい相関が期待される。しかし、相関が見られないという事実は、観測された変動が各サイトに固有の局所的な要因（小規模な地質不整形や地形効果など）に支配されていることを示唆している。

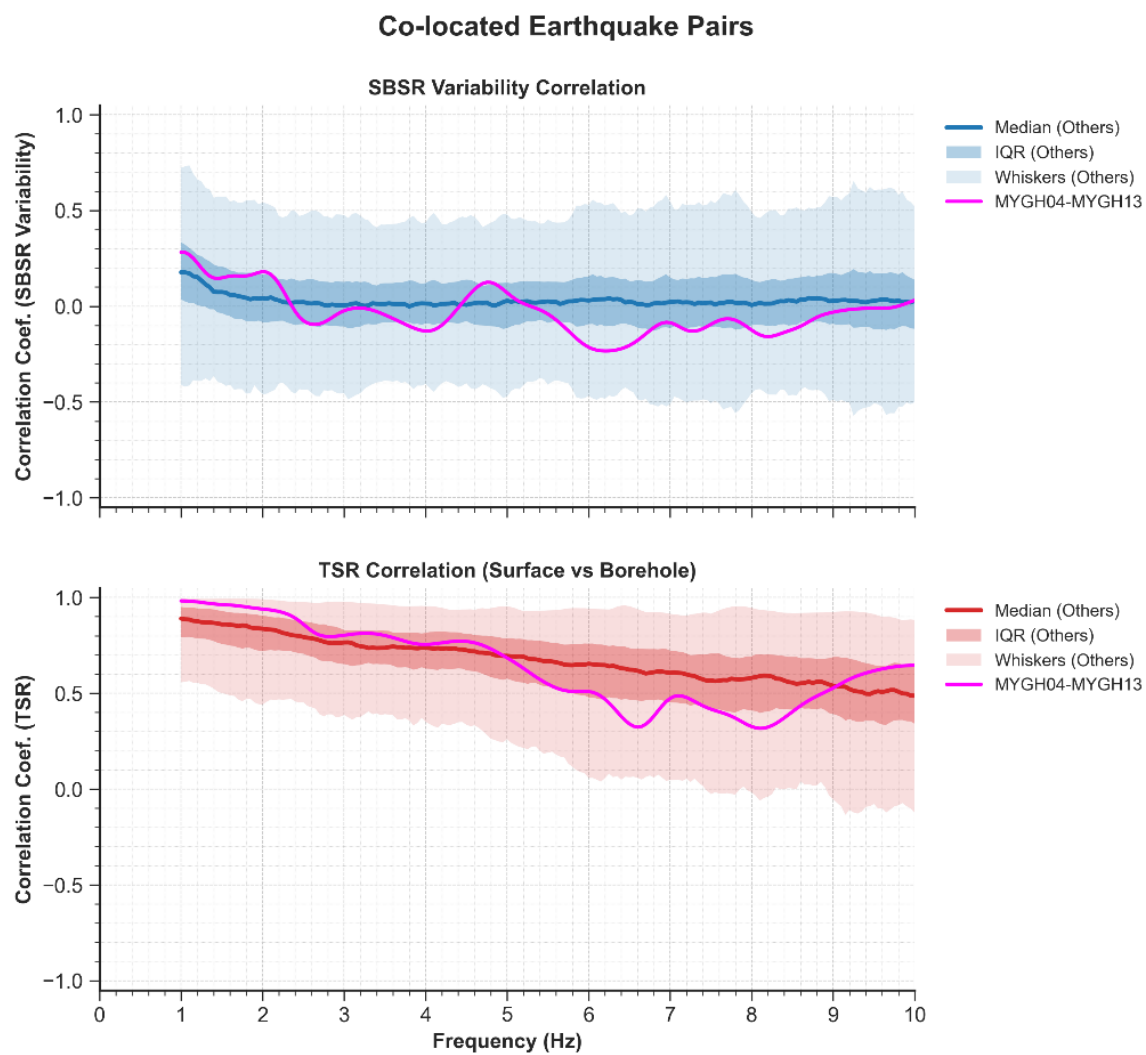


図 3-4 同位置地震ペアに対する相関分析結果

Common-distance, Different-path Pairs

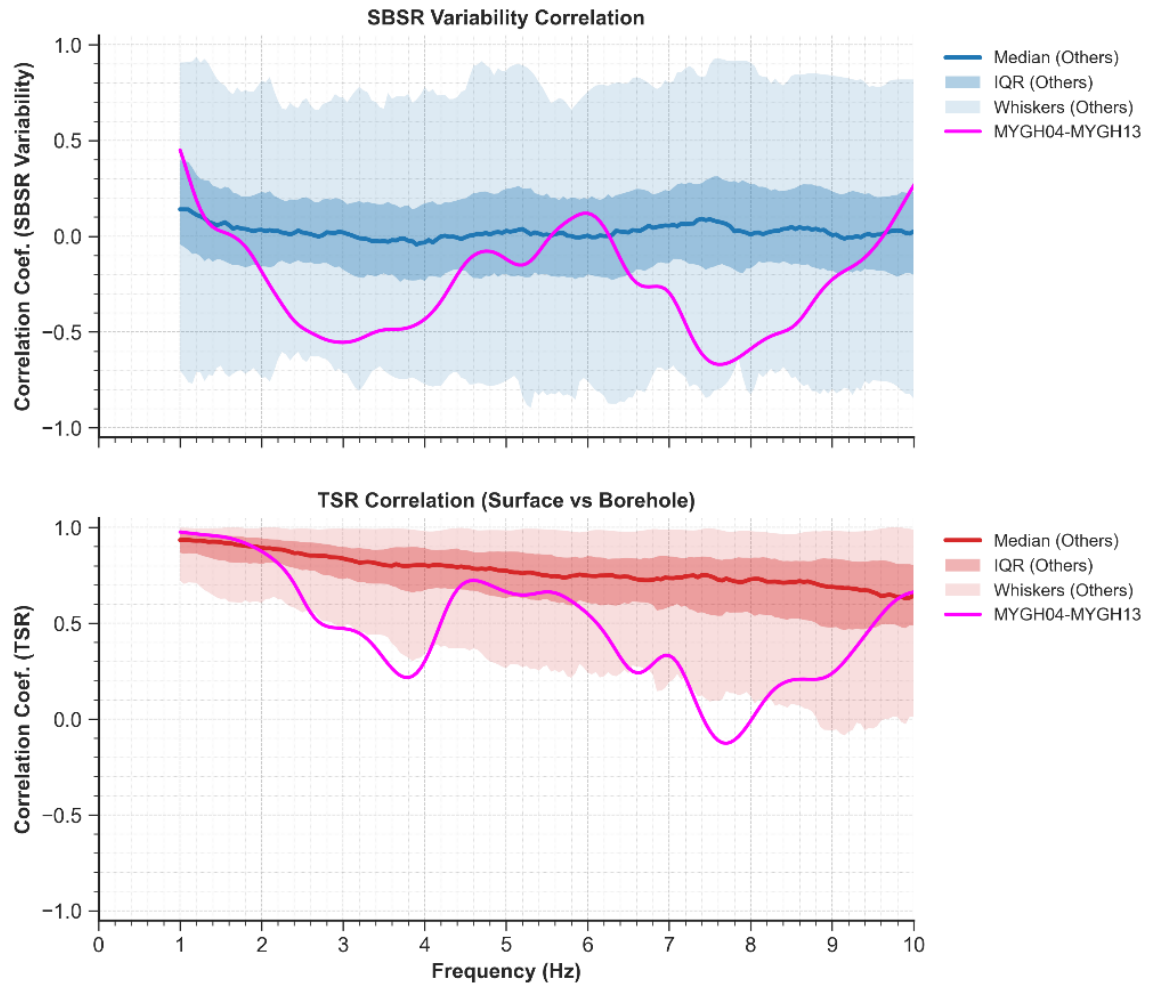


図 3-5 到来方向が異なる地震ペアに対する相関分析結果

MYGH04-MYGH13 ペアにおけるケーススタディ

上記の通り、全体的な傾向としては、SBSR のばらつきが局所的なサイト条件に支配される空間的に独立した現象であることが示された。この一般的な結論の根底にある物理的な解釈をより詳細に探るため、特徴的な観測点においてケーススタディを行う。ここでは、第 2 章で SBSR のばらつきが顕著に大きかった MYGH13 を例に検討する。図 3-4 および図 3-5 の両図においてマゼンタ線で MYGH04-MYGH13 観測点ペアの結果を示す。

Dataset A の結果（図 3-4）は、明確な傾向を示している。MYGH04-MYGH13 ペアの震源・パス効果の相関 ρ_{SP} （下図）は一貫して高く、中央値のトレンドに従っている。そして、SBSR 変動の観測点間相関 ρ_G （上図）が、全周波数帯域にわたって一貫してゼロ付近に留まっている。伝播経路に関連する差異がほぼ排除された地震ペアを使用することで、入射波動場のわずかな変化に対するサイト応答のみを分離していることを示している。

より複雑なシナリオを表す Dataset B の結果（図 3-5）について考察する。このペアにおけるパス効果の相関（下図）は、中央値のトレンドから大きく乖離している。具体的には、3~4.5 Hz および 6~9.5 Hz の周波数帯域において相関が著しく低下し、ほぼゼロになっている。これらの周波数帯域は、MYGH13 の SBSR が到来方位によって最大のピークシフトや形状変化を示す周波数と一致している。この結果は、サイト効果が到来方向に強く依存する場合、TSR の計算過程においてそれらが完全には相殺されないことを示している。この場合、サイト項が地震イベントに依存することになり、標準的な TSR 法的前提条件に適さないこととなる。この前提条件への不適合は、サイト固有の応答が完全には相殺されず、計算されたパス効果の項を歪めることを意味する。その結果、地表 TSR と地中 TSR の間の相関を低下させ、SBSR 変動の観測点間相関（上図）に影響を及ぼす。パス効果の相関が低い同一の周波数帯域（3~4 Hz および 6~9.5 Hz）において、MYGH04-MYGH13 ペアの SBSR 変動の相関は強い負の値となり、-0.5 に近づいている。この結果は、2 つのサイト間における SBSR 変動の逆相関を示している。しかし、この逆相関の解釈には注意が必要である。図 3-6 に逆相関が顕著となる 3Hz における MYGH04 と MYGH13 の SBSR の地震間変動 (ΔG) の比較図を示す。MYGH13 の変動幅は、MYGH04 の変動幅に比べ顕著に大きく、ピーク周波数が方位によって複雑にシフトしている様子が確認できる。このことから、サイト近傍の不整形性が生む複雑な位相干渉により、近接点間であってもスペクトル変動の挙動が同期しない（あるいは逆位相となる）周波数帯域が存在し、その結果として強い負の相関が算出されたと解釈できる。一方、図 3-7 に示す ΔSP^S と ΔSP^B の相関については、従来の仮定どおりの傾きが 1 の正の相関であることが分かる。

MYGH04-MYGH13 観測点ペアの解析から、2 つの重要な知見が得られる。第一に、Dataset B における SBSR 変動の負の相関は、TSR の相関が低い周波数帯域と一致していることである。これは、負の相関が、顕著な方位依存性を持つサイト効果によって基礎的な仮定が侵害されたことによる TSR 法適用上の限界であることを示唆している。第二に、伝播経路特性の差が最小限である Dataset A の解析では、全周波数帯域において SBSR 変動の相関がほぼゼロであることが明らかになった。これらの結果は、MYGH13 における方位の違いによる変動が、サイト条件に起因する局所的な特性であり、近傍の観測点とは空間的に関連していないことを示している。

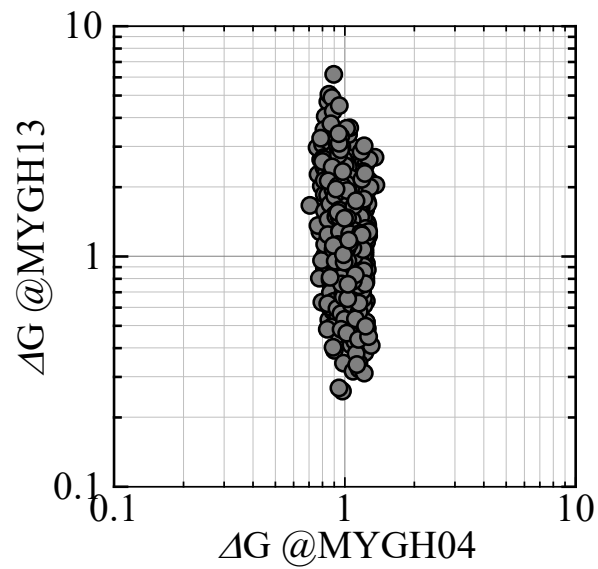


図 3-6 MYGH13 および MYGH04 の SBSR 地震間変動の 3Hz における相関

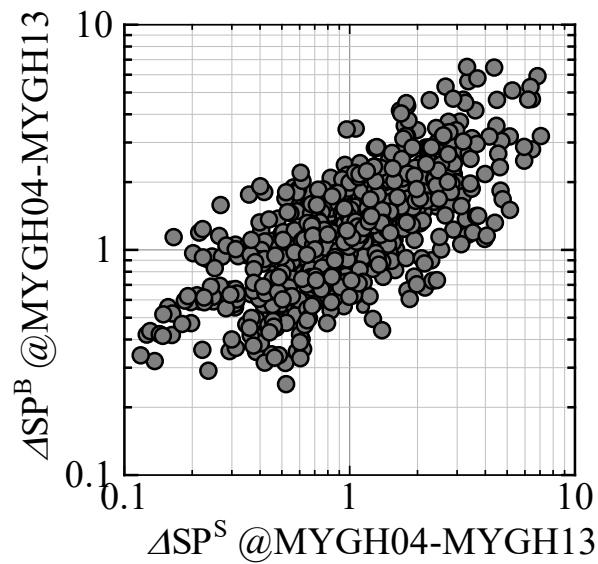


図 3-7 MYGH04-MYGH13 間の ΔSP^S と ΔSP^B の 3Hz における相関

実施適用していく際は、ケーススタディのように個別の観測点ペアがどのような相関関係となっているかを詳細に確認する必要があるものの、全体的な傾向として中央値および四分位範囲については大局的な影響よりも、局所的な影響が大きく、SBSR の地震間変動はサイト固有のものであることが示された。詳細な検討においては、相関係数に加え、周波数ごとの回帰直線の傾きなどにより、見かけ上の相関か否かの判断が可能であることが考えられる。

3.4 まとめ

本章では、KiK-net で観測される SBSR の顕著な方位依存性（ばらつき）の要因を特定するため、TSR 法の枠組みを応用した新たな変動要因分離手法を提案し、日本全国の観測網を用いた大規模な検証を行った。観測点間距離が 20 km 以下である近接観測点ペア（計 293 組）を対象に、伝播経路特性の共有性と SBSR 変動成分の空間相関性を統計的に分析した結果、以下の知見が得られた。

変動要因分離手法の確立と検証

従来の Q 値推定手法であった TSR を、伝播経路特性とサイト特性の分離する手法として再定義した。地表記録および地中記録からそれぞれ独立に算出された TSR が高い正の相関（相関係数 > 0.5 ）を示したことは、本手法が表層地盤の複雑な増幅特性の影響を受けずに、深部伝播経路の特性をロバストに抽出・分離できることを示している。

伝播経路特性の共有性の確認

観測点間距離が 20 km 以内のペアにおいて、 ρ_{SP} は高い相関を示した。これは、対象とした近接ペア間において、震源から地震基盤に至る深部地殻構造や減衰特性が物理的に共有されていることを裏付けるものである。この事実は、次項の変動成分の分析を行うための前提条件（共通入力条件）として機能する。

SBSR 変動成分の局所性

伝播経路特性が共有されている条件下において、SBSR の変動成分の空間相関を分析した結果、その相関係数は全周波数帯域（1 ～ 10 Hz）においてほぼゼロ（無相関）であった。深部の伝播経路特性は近接観測点と類似しているにもかかわらず、SBSR の変動挙動は類似しておらず、SBSR の方位依存性が広域的な伝播経路の不均質性には起因しないことを示すものである。

以上の結果から、SBSR の方位依存性は、観測点直下の数 km 以内の範囲で独立して変化するような、局所的なサイト近傍の不整形地盤構造や地形効果に支配されていると結論付けられる。この結論は、地震動予測モデル（GMM）において従来は偶然的不確実性として処理されてきた変動の多くが、実際にはサイト固有の認識論的不確実性であることを示唆している。すなわち、3 次元的なサイト増幅特性を適切にモデル化することで、予測ばらつきを低減し、より精度の高いサイト特性評価が可能となる物理的根拠が得られた。

第3章の参考文献

- [3-1] Matsuzawa, T., Hasegawa, A., & Takagi, A. (1989). QP structure beneath the northeastern Japan arc estimated from twofold spectral ratio method, *Tohoku Geophys. Journ.*, 32, 21-33.
- [3-2] 松澤孝紀, 武尾実, 井出哲, 飯尾能久, 伊藤久男, 今西和俊, 堀内茂木 (2003) 長野県西部地域における二重スペクトル比による S 波減衰の推定, *地震 第2輯*, 56(1), 75-88.
- [3-3] 泉谷恭男(2000) 強震動の二重スペクトル比から推定した九州南部における Qs 値, *土木学会論文集*, 640, 225-230. doi:10.2208/jscej.2000.640_225.
- [3-4] Anderson, J. G. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. in *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, B.C., Canada*, Paper No. 243.

第4章 サイト特性における不確実性の整理と 不整形地盤サイトにおける物理的検証

4.1 概要

第2章および第3章における観測記録の分析では、地表/地中スペクトル比（SBSR）に見られる方位依存性が、震源や伝播経路といった大局的な要因ではなく、サイト近傍の局所的な地盤特性に強く支配されていることを統計的に明らかにした。これらの変動は、従来の耐震設計実務において標準的に用いられている1次元重複反射理論（水平成層構造仮定）では説明がつかない現象であり、観測値と理論値の間に無視できない乖離を生じさせる。

本章では、まず近年の確率論的地震ハザード評価（Probabilistic Seismic Hazard Assessment; PSHA）における不確実性の分類体系を整理し、本研究で扱うSBSRの変動が、除去不可能な偶然的ばらつきではなく、適切な物理モデルの導入により低減可能な認識論的不確実性であることを理論的に位置づける。その上で、2次元有限要素法（2D-FEM）を用いた数値シミュレーションを実施し、不整形地盤における波動の散乱・干渉現象を再現することで、観測された方位依存性が地下構造に起因する物理的実体であることを演繹的に検証する。

4.2 サイト特性評価における不確実性の分類と本研究の位置づけ

PSHAの信頼性を担保するためには、予測に伴う不確実性を物理的背景に基づいて厳密に分離・評価することが不可欠である。ここでは、Senior Seismic Hazard Analysis Committee（SSHAC）ガイドライン^[4-1]等に基づく定義と、モデル中心的な視点からの分類を行い、本研究の物理的検証の意義を明確にする。

地震工学における不確実性は、一般に以下の2種類に大別される。

- ・ 偶然的ばらつき（Aleatory Variability）

自然現象そのものが持つ本質的なランダム性に起因するばらつきである。特定のモデル体系の中では削減不可能とみなされ、ハザード評価において確率分布（標準偏差 σ ）として直接組み込まれる。

- ・ 認識論的不確実性（Epistemic Uncertainty）

現象に対する知識の欠如やデータ不足、モデルの不完全さに起因する不確実性である。理論的には、データの蓄積やより高度なモデル化によって低減可能であり、ロジックツリーのブランチとして扱われる。

しかし、Wen et al. (2003)^[4-2] が指摘するように、この境界は絶対的なものではなく、採用するモデルに依存する（モデル中心的視点）。例えば、地盤内の微細な不均質性を確率場として扱うならば、そ

の変動は偶然的となるが、詳細な探査に基づき決定論的な構造としてモデル化すれば、それは認識論的な領域へと移行する。

従来の強震動予測式（Ground Motion Model; GMM）は、空間的なばらつきを時間的なばらつきと等価とみなすエルゴード仮説に基づいていた。この仮定下では、サイト固有の特性に起因するバイアスもすべて偶然的ばらつき（大きな σ ）の中に埋没していた^[4-3]。

しかし、Al Atik et al. (2010) ^[4-4]による残差分解の枠組みは、単一観測点における地震内残差 δWS_{es} および σ_{SS} を以下のように分離することを可能にした。

$$\delta WS_{es} = \delta W_{es} - \delta S2S_s \quad \text{式 (4-1)}$$

$$\sigma_{SS} = \sqrt{\phi_{SS}^2 + \tau^2} \quad \text{式 (4-2)}$$

ここで、 δW_{es} は地震内の残差、 $\delta S2S_s$ は観測点固有の平均的な増幅特性の偏り、 ϕ_{SS} （Single-Station residual）は $\delta S2S_s$ の標準偏差、 τ は地震間残差の標準偏差である。非エルゴード評価への移行とは、これまで偶然的ばらつきとして扱われていた σ_{SS} を分離し、これを推定すべきパラメータ（認識論的不確実性）として再定義することを意味する。

地盤増幅特性における具体的な現象は、採用する解析モデルによって分類が異なる。

1 次元解析（水平成層仮定）を採用する場合

実際の地盤が有する 3 次元的な不整形構造（盆地端部効果や埋没谷）による増幅や方位依存性は、モデルでは表現できないため、観測データ上の説明できないばらつきとして現れる。1 次元重複反射理論として仮定されている条件としては、水平成層構造、平面波入射、等方弾性体、均質媒体が上げられる。これらに反した場合、即ち 2D/3D 構造（不整形・地形効果）、球面波・表面波の混入、非線形応答、媒質の異方性、周辺・地中構造物との相互作用など、これらは偶然的ばらつきを増大させる要因として処理される。従来のエルゴード的 GMM では、サイトパラメータとして AVS30 や D1400（ V_s が 1400 に達する深さ）など、 V_s ベースの代理指標や堆積盆地構造の特徴を大まかに捉える指標に留まっており、残りはすべて偶然的ばらつきとして扱われる。

2 次元・3 次元解析（不整形考慮）を採用する場合

地下構造の幾何形状（不整形）をモデル化することで、方位による応答の違いや局所的な増幅は、物理的に予測可能な現象となる。この場合、不整形形状の同定精度やモデル化誤差が認識論的不確実性となる。一方で、媒質の異方性や不均質散乱、相互作用といった現象は偶然的ばらつきとして残ることが考えられる。

第 2 章で確認された SBSR の方位依存性は、1 次元理論の枠組みでは偶然的ばらつきとして処理せざるを得ない。しかし、これをランダムノイズとして扱うことは、特定の方位から到来する地震波に対する評価を見誤る可能性がある。本章の目的は、この方位依存性が地下の不整形構造という物理的実体に起因することを数値解析により明らかにすることにある。これにより、観測された変動を除去不可能な偶然的ばらつきから、適切なモデル化（不整形地盤モデル）によって説明・予測可能な認識論的不確実性へと昇華させ、次章以降で提案する評価手法（系統的ばらつきの分離）の理論的妥当性を担保する。

4.3 数値解析の概要と解析条件

本節では、不整形地盤における波動伝播特性評価するために構築した数値解析モデルの詳細について述べる。解析には、2次元有限要素法プログラム F-DAP III を採用した。本プログラムは周波数領域における応答解析手法であり、要素平面を3角形、4角形でモデル化できることから幾何形状の取り扱いに優れており、不整形地盤の解析に適している。

解析領域には、2次元の平面ひずみモデルを用いており、S波の1波長に対し要素平面が10個含まれるように要素幅を設定することとした。有限の解析領域で半無限地盤を模擬するため、側面境界にはエネルギー伝達境界をモデルの左右端部に設置した。これにより、不整形部から発生した散乱波や表面波が境界で反射することなく、側面以遠の半無限成層地盤へ逸散する挙動を表現した。また、モデル底面には粘性境界を設置し、下方への波動エネルギーの逸散を考慮した。入力地震動は、この粘性境界を通して底面から鉛直上方へ入射させる等価入力法（2E波入力）を用いた。

入力波には、特定の震源特性の影響を排除するため、振幅スペクトルが平坦で位相をランダムとした擬似ランダム波を用いた。解析では、同一の地盤モデルに対して面内波（SH波相当）および面外波（SV波相当）を入力し、その応答差を比較した。1次元水平成層地盤への鉛直入射であれば、SH波とSV波の応答は理論的に一致する。したがって、両者の応答に差が生じれば、それは地盤の不整形性に起因する2次元的な波動現象が生じていると解釈できる。

4.3.1 周期的な不整形境界を有する地盤の応答特性

まず、不整形地盤による応答特性の基礎的な物理挙動を把握するため、既往研究^[4-5]に基づく周期的な正弦波状の層境界を有する地盤モデルを対象とした。このモデルは、単純化された幾何形状でありながら、不整形地盤のフォーカシングや共振モードの分離などを明瞭に示すことが知られている。澤田他(1994)^[4-5]の検討では、SH波の入射波に対する地表面の応答（2E/E）のみが検討されており、本研究で対象とする下降波の影響も含めた応答（2E/E+F）や面内波についての言及がない。本節では、澤田他(1994)^[4-5]の再現解析を通じ、不整形地盤の2E/E+F伝達関数でも同様の傾向が現れるか、

解析モデルは、均質な基盤層と堆積層の2層構造とし、その境界面の深さ $h(x)$ が水平位置 x に対して以下の式で表される波上の境界とした。

$$h(x) = D - \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \quad \text{式 (4-3)}$$

ここで、幾何パラメータおよび物性値は、澤田他(1994)^[4-5]の諸元を参考に設定する。Lは凹凸1つ分の水平長さ(m)、Dは境界面の平均深さ(m)、Hは凹凸の振幅(m)を表しており、それぞれ $L = 320$ m、 $D = 40$ m、 $H = 20$ mとした。境界面が最も深い水平位置をA点、中間の深さの水平位置をB点、最も浅い水平位置をC点とし、それぞれの直下200 mの地中の応答と地表の応答のフーリエスペクトル比を比較した。地盤モデルは水平方向1280 m、鉛直方向250 mの2次元モデルとした。基盤層は $V_s=400$ m/s、堆積層は $V_s=100$ m/sとした。モデルの模式図を図4-1に示す。

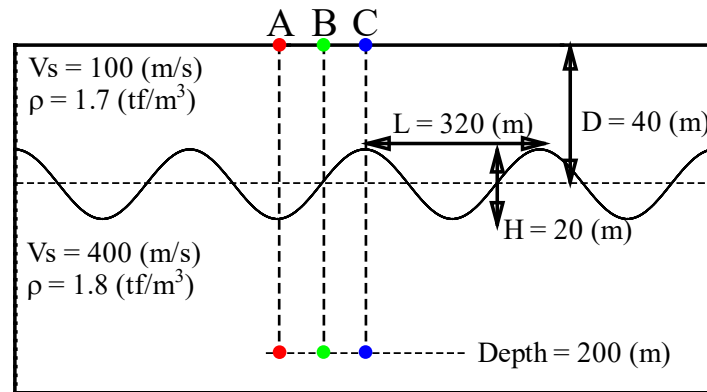


図 4-1 有限要素法における不整形地盤の解析モデル

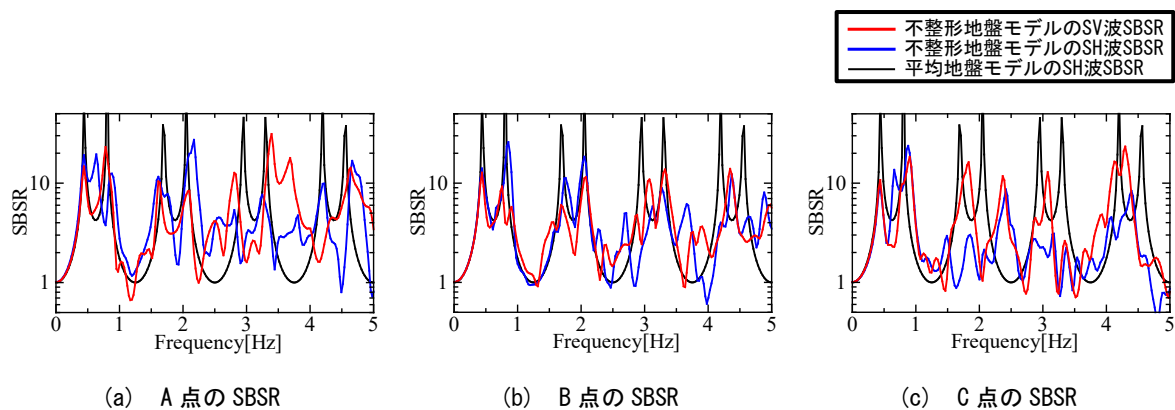


図 4-2 不整形地盤における各観測点の SBSR

図 4-2 に、A～C 点における SH 波および SV 波の SBSR を示す。図中の黒線で示す SBSR は、表層の層厚を平均深さである 40 m とした、2 層の 1 次元地盤モデル（以降、平均地盤モデルと表記）の理論伝達関数である。澤田他(1994)^[4-5]における検討では、地盤増幅率のピークが分離することを示しているが、SBSR においても、0.7 Hz 付近のピークでその傾向が表れている。また、波状境界の頂点と底部（C 点および A 点）では、鉛直下方入射にも関わらず SH 波と SV 波に明瞭な差が出ており、境界面の不整形によって水平成分で異なる SBSR が得られることを示唆している。

4.3.2 局所的な不整形境界を有する地盤の応答特性

第 2 章の詳細な分析をした地点である CHBH14 観測点直下においては、図 4-1 のような波状ではなく一山の境界面を持つことが考えられる。澤田他(1994)^[4-5]による地盤モデルをベースに、に示すような一山だけを取り出したモデルを用いて 2 次元有限要素解析を行い、局所的な不整形性が SBSR に及ぼす影響について確認した。なお、CHBH14 観測点は境界面の山の端部（B 点）に相当する場所に位置していると想定している。

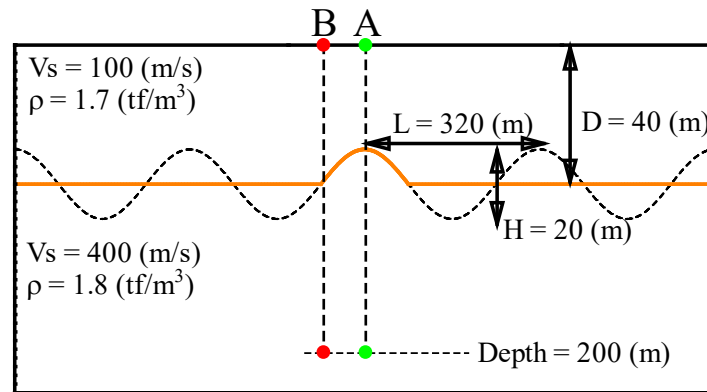


図 4-3 一山の不整形境界をもつ地盤モデル

図 4-4 に不整形境界における山の頂点（A 点）および端部（B 点）の SBSR を示す。比較対象として直下の地下構造を 1 次元地盤と仮定したときの理論伝達関数を黒線で示す。B 点では、理論伝達関数とピーク位置が良く一致しているものの、1.7 Hz や 3 Hz 付近ではピークの振幅が落ち込むなどの影響が出ている。一方、A 点では、直下の地下構造を 1 次元地盤と仮定したときの理論伝達関数からはピークが大きくずれており、平均地盤モデルでピークが出るような周波数にピークを持つような SBSR が得られた。また 1.6 Hz や 2.7 Hz 付近では、平均地盤モデルでも直下 1 次元モデルでもピークが無い周波数にピークが現れており、図 2-7 の P3 で見られたような現象が生じることが確認できた。SH 波と SV 波とを比較すると、図 4-2 に示す波状境界モデルのように顕著に差は表れないものの、特に A 点において水平成分に差がでることが確認できた。CHBH14 観測点を B 点として想定していたが、観測にみられるほどの理論伝達関数との乖離やピーク周波数の分離は現れなかった。現在は標準貫入試験の局所的な情報を根拠としているため、より広域な CHBH14 観測点周辺の地下構造に関する情報を収集し、不整形境界との位置関係を精査する必要がある。

本節における有限要素解析では、CHBH14 観測点の南北方向の 2 次元断面のみを模擬しているため、到来方向との関連性を明言することはできないが、図 2-7 で見られるような観測 SBSR のピークの出現や分離が、地中地震計以浅の不整形性によって生じることを定性的に示した。また不整形地盤に鉛直下方入射をした SH 波と SV 波の SBSR にも差異があり、水平成分に差異が発生する要因にもなり得ることを示した。

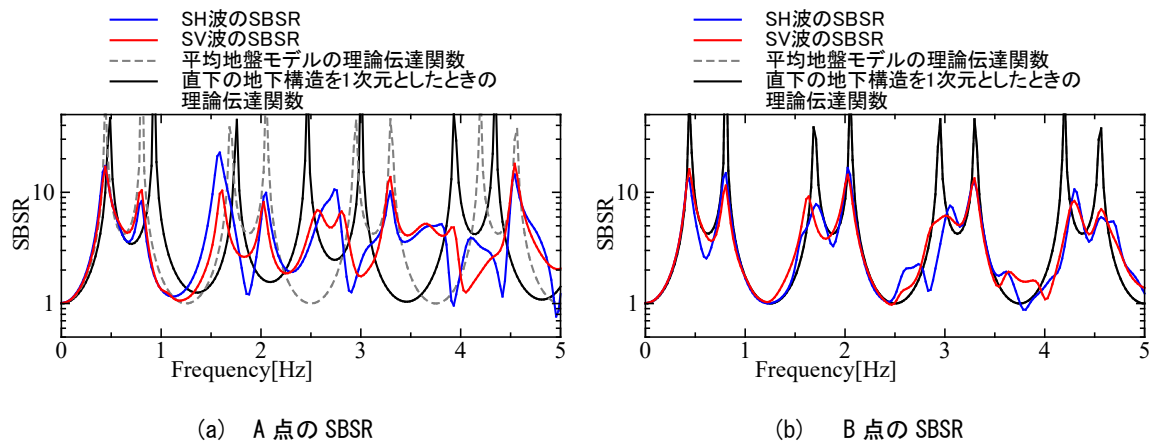


図 4-4 一山の不整形境界をもつ地盤の SBSR

4.3.3 不整形地盤による散乱波等の空間的影響範囲の検討

前節までは、不整形地盤の直上における応答に着目したが、不整形構造により生成された散乱波は、隣接する水平成層部にも伝播し、その応答特性に影響を及ぼす可能性がある。本節では、不整形地盤の空間的な影響範囲について検討する。

不整形部 ($x < -80 \text{ m}$) における影響を確認するため、不整形振幅 H を変化させたパラメトリックスタディを実施した。凸形状 ($H > 0$) および凹形状 ($H < 0$) について検討を行った。検討ケースを表 4-1 に示す。

表 4-1 空間的影響範囲の検討ケース

ケース	$H(m)$	形状
Case 1	20	凸型
Case 2	40	凸型
Case 3	60	凸型
Case 4	-20	凹型
Case 5	-40	凹型
Case 6	-60	凹型

まず、SBSR におけるピークの方位による変動が、不整形境界面からの距離と相関があるかを確認する。ここでは、第 2 章で提案した、地中記録と地表記録を同時に水平回転させた際の SBSR のピーク変動を抽出した指標である、最大/最小振幅比を用いて SBSR におけるピークの方位による変動が不整形境界面との距離によって変化するかを検討した。本節では、平均地盤モデルの 2 次ピークである 0.8 Hz 付近を対象にピークの変動を抽出した。図 4-5 に各ケースの最大/最小振幅比と水平距離との相関図を示す。地盤モデルは左右対称のため、左半分のみを図化している。 $x = -80 \text{ m}$ 地点は不整形から水平成層に切り替わる地点であるが、不整形境界面が凸型となる Case1～3 において、不整形境

界面から離れるにつれて最大/最小振幅比が増大する、即ち SBSR の方位によるばらつきが大きくなる結果となった。不整形境界面が凹型となる Case4~6 においても、最大/最小振幅比の減少傾向は見られなかった。

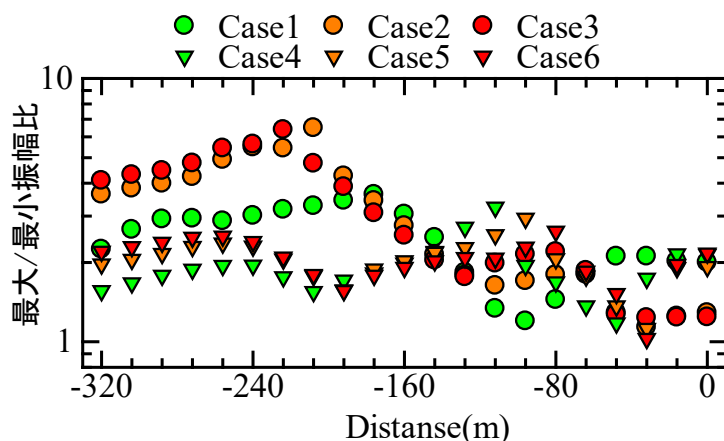


図 4-5 各ケースの 0.8Hz におけるピークの最大/最小振幅比の空間的影響範囲

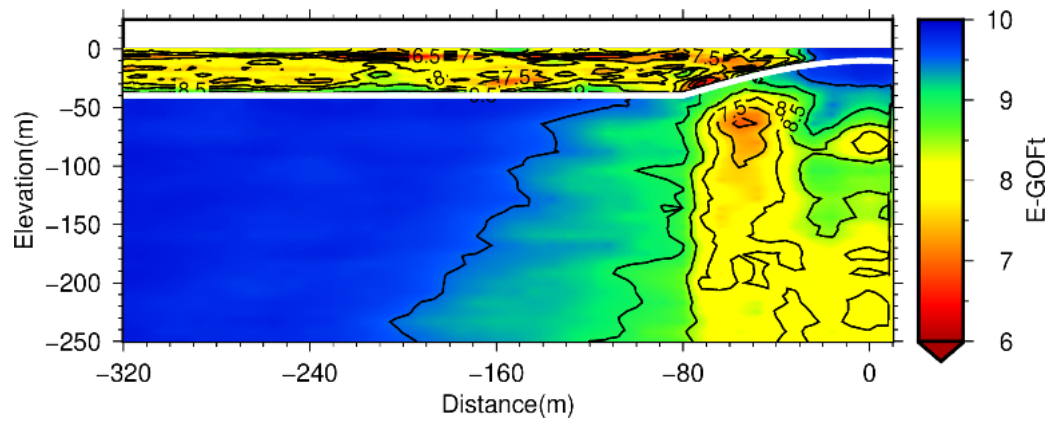
不整形地盤の 2 次元 FEM による解析結果と、直下の 1 次元構造を水平成層とした場合の重複反射による理論波形との比較を行い、不整形の有無により計算波形にどのような差異が見られるかを検討した。

波形の差異を面的に捉えるために、適合度判定指標を用いて評価した。ランダム波を使用していること、また前節で示したように高次モードにおいて不整形境界面の影響が表れていることから、包絡形での比較が可能な適合度判定指標である鈴木他(2018)^[4-6]による $E-GOF_t$ を使用した。 $E-GOF_t$ は、観測波形と合成波形の高周波数帯域における一致度を定量評価するために開発された指標で、値が 10 に近いほど両者が一致し、値が低いほど乖離が大きいことを示す。本検討では、2D-FEM の計算波形を観測波形、直下の 1 次元構造を用いた重複反射理論による理論波形を合成波形とみなし、適合度が高いときに 1 次元理論で説明可能、低いときに 2 次元構造の影響が強いとみなす。

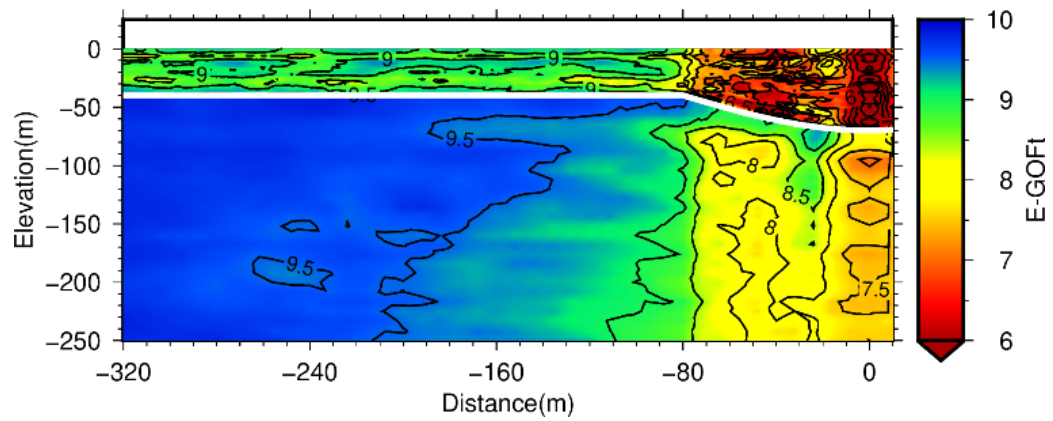
図 4-6 に特徴が顕著に現れた Case3 及び Case6 の面外波における $E-GOF_t$ のコンタ図を示す。不整形境界面が凸型となる Case3 において、水平成層部の上層地盤では、全体的に $E-GOF_t$ が低くなっており、 $E-GOF_t$ の低いエリアが層状に分布している。面外波であることから Love 波が励起されている可能性が考えられる。Case6 でも、 $E-GOF_t$ の低下は少ないものの、同様の傾向が見られた。Case6 の不整形境界面の上層においては、 $E-GOF_t$ が著しく低下している。これは盆地状の基盤にトラップされるような重複反射によるものと考えられるが、本検討ではランダム波を使用しており $E-GOF_t$ との相性が良くない可能性もあるため、留意が必要である。下層に着目すると、 $x = -80 \sim 0 \text{ m}$ において大きく $E-GOF_t$ が低下しており、これらは不整形境界面による散乱波による影響と考えられる。水平成層部分への影響はあまり小さくなく、モデル化した範囲では、 $x = -160 \text{ m}$ 付近までが影響範囲と考えられる。

以上のことから、局所的な不整形境界面によって水平成層部における SBSR の方位による変動は、散乱によって励起された表面波に起因することが考えられる。これは、サイト特性評価においては、

直下のボーリング柱状図情報などの点の情報だけでなく、周辺の地質構造を含めた空間的な評価が必要であり、これを無視することは認識論的不確実性を増大させる原因となりうる。



(a) Case3 面外波の E-GOF_t



(b) Case6 面外波の E-GOF_t

図 4-6 2D-FEM と 1 次元重複反射による波形の E-GOF_t

4.4 地形および入射角に起因する地表/地中スペクトル比の感度解析

前節までは CHBH14 観測点を対象に、地中の不整形構造が SBSR の方位依存性に与える影響を確認してきた。しかし、多くの観測点において詳細な地下構造を把握することは困難であり、これが認識論的不確実性の主要な要因となっている。一方で、地表面における地形の形状については数値標高モデル等から比較的容易に取得可能である。本節では、KiK-net つくば観測点（IBRH19）を対象に、前節と同様に単純化したモデルを用いた 2D-FEM を実施する。地形勾配および不整形性がピーク周波数の変動に及ぼす影響を定性評価し、地盤の不確実性の代理指標としての地形指標の有用性について議論する。

4.4.1 IBRH19 観測点の周辺状況および観測記録

IBRH19 観測点は筑波山の南西麓、標高約 170m の斜面に位置している。周辺地形は山体からの緩やかな傾斜が続いており、数値標高モデル^[4-7]によれば観測点直近の地形勾配は北東方向で約 14° となっている。PS 検層による土質柱状図^[4-8]によれば、2m の盛り土の下に筑波山を構成する花崗岩が表出し、硬い地盤を有する観測点である。図 4-7 に IBRH19 観測点の周辺地図を、図 4-8 に筑波山の傾斜に沿った方向（測線 1、北から時計回りに 25° ）での標高の断面図を、図 4-9 に測線 1 に直交する方向（測線 2、北から時計回りに 115° ）での標高の断面図を示す。

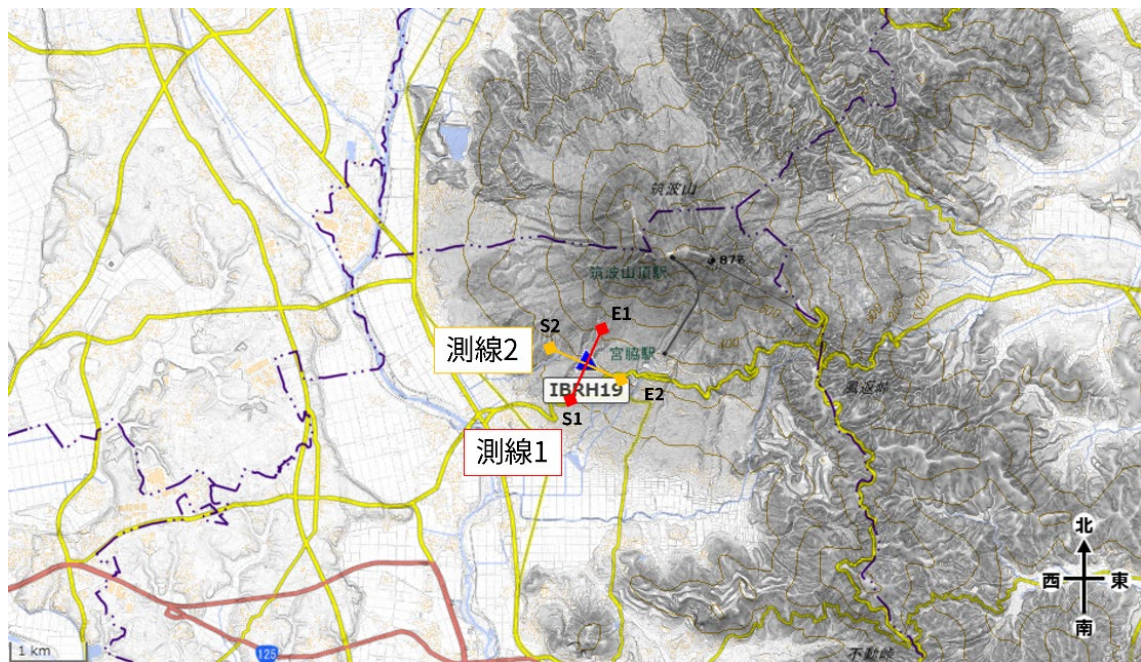


図 4-7 IBRH19 観測点周辺の標高地図（国土地理院地図より転載，加筆）

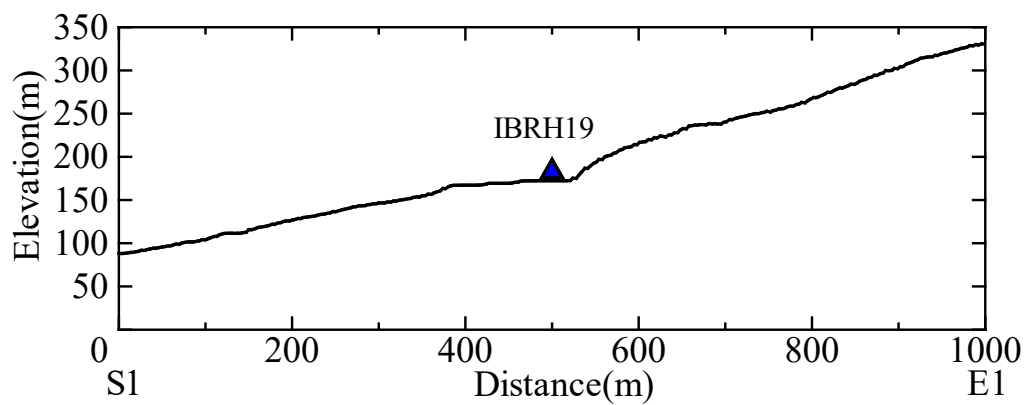


図 4-8 側線 1 の 標高断面図

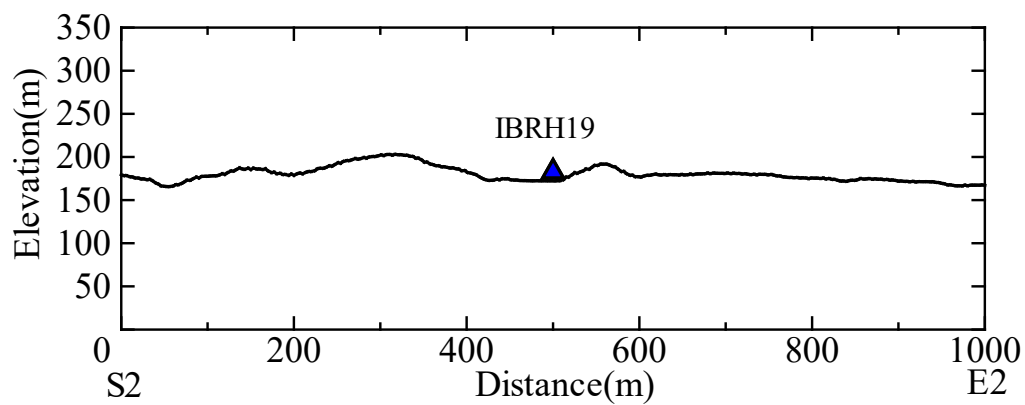


図 4-9 側線 2 の 標高断面図

また、IBRH19 観測点における SBSR を図 4-10 に示す。本観測点も、方位によってピーク周波数の変動が顕著に表れる観測点である。南から南西にかけての方向から到来する地震波では 3-4Hz 付近で 1 次ピークを有するのに対し、北東方向から到来する地震波では 5-6Hz で 1 次ピークを有している。図中黒線は、表 4-2 に示す PS 検層に基づいた地盤モデルを用いて 1 次元重複反射理論により計算した理論伝達関数 ($2E/E+F$) を示す。また黒破線は解放基盤に対する理論増幅率 ($2E/2E$) を示す。

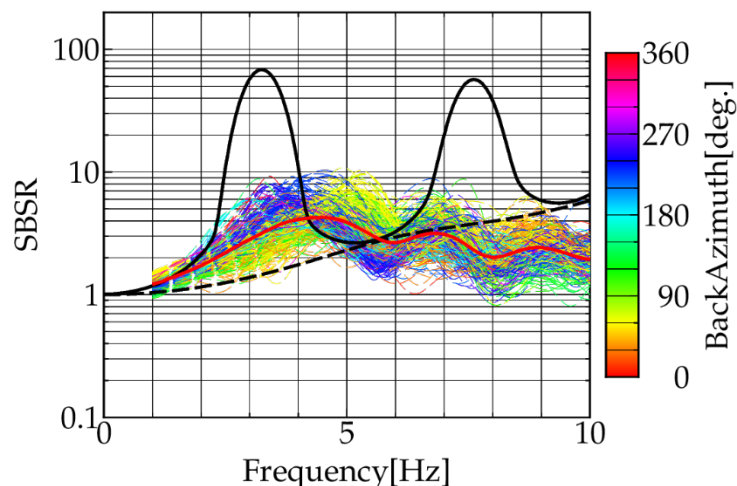


図 4-10 IBRH19 観測点の観測 SBSR

表 4-2 IBRH19 観測点の PS 検層に基づく地盤モデル

density	Vp	Qp	Vs	Qs	Thickness
1.6	300	10	100	10	2
2.1	3100	120	1200	120	34
2.6	4800	210	2100	210	56
2.6	5300	280	2800	280	118
2.6	5300	280	2800	280	1

4.4.2 感度分析のための検討ケースの設定

本節では、地表面の勾配および地下境界面の傾斜が、波動の干渉とサイト特性の変動に与える影響を評価する。これらを物理的に分離して評価するため、以下に示す幾何学的な構成が異なる 3 つの 2D-FEM モデルを設定した。各ケースにおいて、地盤の物性値は前述の IBRH19 の PS 検層結果に基づき、上層 $V_s=744$ m/s、下層 $V_s=2529$ m/s で共通としている。これらは、表 4-2 の 1-2 層目を 1 層とした時の平均 S 波速度、3-4 層目を 1 層とした時の平均 S 波速度に該当する。また、傾斜はいずれも 5° に固定した。これは、全観測点の周辺地形の勾配の統計を取った際の標準偏差に相当する。

- ・ Case1 地表傾斜・地下水平モデル（地表勾配 5° / 地中境界面 0° ）

地表面に 5° の一定傾斜を与え、速度境界面を水平に設定したモデルである。このモデルは、地点の標高差のみが存在し、地下構造は 1 次元的な水平成層に近い状態を想定している。入射波と地表面での反射波の往復経路長が水平位置によって異なるため、地点ごとの位相干渉条件の変化がどの程度増幅特性の入射角依存性に寄与するかを確認する。

・ Case2 地表水平・地下傾斜モデル（地表勾配 0° / 地中境界面 5° ）

地表面は水平であるが、地下の速度境界面に 5° の傾斜を与えたモデルである。これは、地表からは視認できない地下の不整形性のみが存在するケースに相当する。境界面の傾斜に起因するモード変換（SV 波から P 波への変換等）や側方への散乱が、地表のスペクトル比に与える影響を抽出する。

・ Case3 地表・地下傾斜モデル（地表勾配 5° / 地中境界面 5° ）

地表面と地下境界面の両方が同一の 5° の傾斜を持ち、互いに平行であるモデルである。

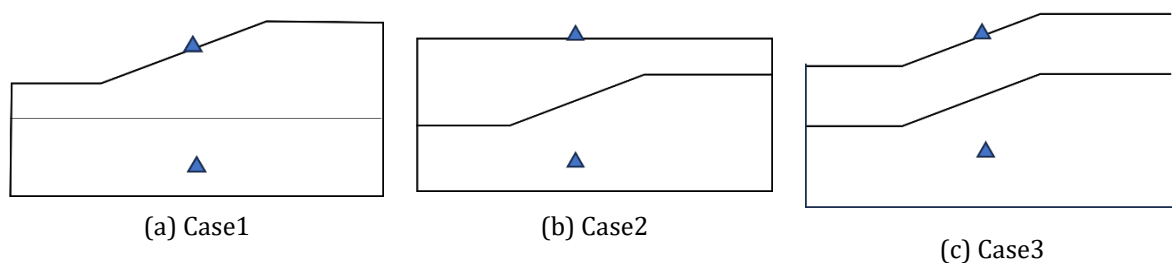


図 4-11 検討ケースモデルの模式図

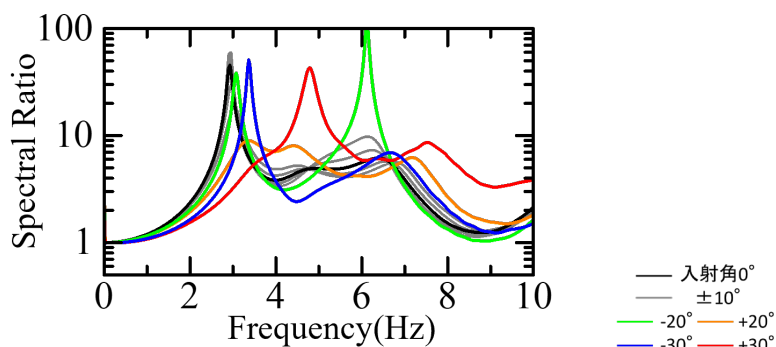
各ケースに対し、震源の方位特性を模擬するために SV 波の入射角をパラメータとした。鉛直下方入射を基準とし、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ の計 7 条件について解析を行った。特に入射角が大きい時、境界面での全反射の可能性や、地形による回折波の影響が顕著になると考えられるため、1 次元重複反射理論からの乖離した挙動に注目する。なお、入射波は前節と同様 40.96 秒間の擬似ランダム波の平面波を使用した。

4.4.3 数値解析結果と考察

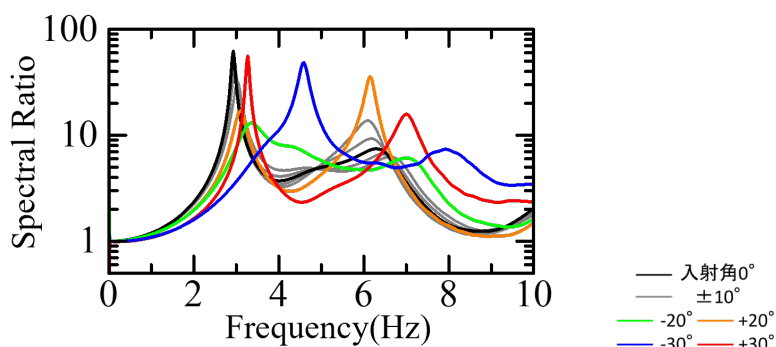
解析の結果の図を図 4-12 に示す。伝達関数 ($2E/E+F$) のピーク周波数に有意な変動が生じる境界条件は、地表面および境界面の傾斜角そのものではなく、両者のミスマッチによって生じる層厚の空間的な変化であることが明らかとなった。

具体的には、Case1 および Case2 では左右で層厚が変化しており、入射方位に応じた顕著なピークシフトが認められた。入射角はプラスの場合はモデルの左側から、マイナスの場合は右側から平面波が入射するが、Case1 では $+30^\circ$ の場合に、Case2 では -30° の場合に顕著にピーク周波数が異なる傾向が確認される。これは、層厚が薄い方からの入射に対し感度が高くなることが考えられる。対照的に、Case3 においては、幾何学的な非対称性は存在するものの、層厚が一定に保たれるため SBSR のピーク変動は比較的安定した傾向を示した。

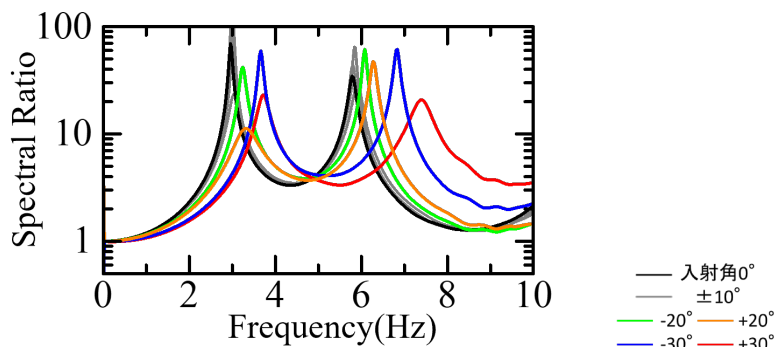
本解析結果は、SBSR にみられるピーク変動の入射角依存性を支配する物理量が層厚の空間的な変化であることを示している。実務上、地下境界面の傾斜角を精緻に特定するにはコストを支払う必要があるが、地表面に勾配が存在するという事実は、地下境界面が水平であれ傾斜であれ、層厚を一定に保つための幾何学的制約を維持する難易度を高める要因となる。したがって、地形勾配の情報は、それ単体で SBSR のピークの変動を規定するものではないが、詳細な地下構造が未知である状況下において、サイトが層厚変化に伴う不確実性を内包している可能性を識別するための代理指標として位置づけられる。



(a) Case1 の伝達関数



(b) Case2 の伝達関数



(c) Case3 の伝達関数

図 4-12 各ケースの 2D-FEM 解析結果

4.5 まとめ

本章では、観測された SBSR の方位依存性および 1 次元理論との乖離について、その物理的要因を解明するために数値シミュレーション (F-DAP III を用いた FEM 解析) による演繹的な検証を行った。得られた知見は以下の通りである。

方位依存性の物理的実証

鉛直下方入射条件下であっても、地下の不整形構造 (周期的境界や局所的凸部) が存在することで、SH 波と SV 波の応答に明確な差異が生じることを確認した。これは、観測された方位依存性が、入力波のランダム性 (偶然的ばらつき) ではなく、地下構造の不均質性に起因する物理現象 (認識論的不確実性) であることを裏付けるものである。

1 次元理論で説明できないピーク

不整形地盤上では、直下の 1 次元構造では説明できない周波数帯にピーク (共振) が生じたり、逆にピークが消失・分離したりする現象が再現された。これらは、周辺地盤との相互作用や 2 次元共鳴モード、あるいはモード変換によるものであり、従来の 1 次元解析では予測不可能な認識論的不確実性に分類されうるものである。

散乱波の空間的影響

不整形部で生成された散乱波は、隣接する平坦部へも層状に伝播し、広範囲にわたって 1 次元理論との乖離を引き起こすことが E-GOfT 解析により可視化された。これにより、単一地点のボーリング情報のみに依存することのリスクが明らかとなった。

地形勾配による感度分析

多次元に詳細な地下構造が未知であっても、地表面の傾斜が波動の斜め入射と組み合わせることで、サイト特性の変動を誘発する物理的な指標となり得ることを示した。地形に勾配が存在することは、その地点が幾何学的な非対称性を有していることを意味し、入射方位に起因する認識論的不確実性の生じやすさや変動幅を事前に拘束するための重要な代理指標となることが確認された。

以上の結論より、観測記録に見られる SBSR のばらつきの多くは、除去不可能なランダムノイズではなく、地盤の不整形性を考慮したモデル化によって説明・予測可能な成分であることが明らかとなった。これは、次章以降で提案する系統的ばらつきとして分離・評価するアプローチの物理的妥当性を保証するものである。第 5 章では、この物理的知見に基づき、観測データからこの系統的成分を統計的に分離・抽出する具体的な手法について論じる。

第4章の参考文献

- [4-1]USNRC (2012). Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies, NUREG-2117, US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., USA.
- [4-2]Wen, Y. K., Ellingwood, B. R., Veneziano, D., & Bracci, J. (2003). Uncertainty modeling in earthquake engineering. MAE center project FD-2 report.
- [4-3]Atkinson, G. M. (2006). Single-station sigma. *Bull Seismol Soc Am*, 96(2), 446-455. doi:10.1785/0120050137.
- [4-4]Al Atik, L. A., Abrahamson, N., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794-801. doi:10.1785/gssrl.81.5.794.
- [4-5]澤田純男，土岐憲三，福井基史(1994) 地層境界で発生する散乱波を考慮した地盤震動解析，京都大学防災研究所年報，No. 37, B-2, pp. 15-33.
- [4-6]鈴木文乃，加藤研一，渡辺哲史(2018) 地震観測波形とシミュレーション波形の適合度評価 Frequency domain error の改良と V & V への適用，日本建築学会構造系論文集。83(752)，1435-1444. doi:10.3130/aijs.83.1435.
- [4-7]国土地理院，基盤地図情報ダウンロードサービス，<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>（参照 2024-12-08）
- [4-8]National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.

第5章 地表/地中スペクトル比における

偶然的ばらつきと系統的ばらつきの分離

5.1 概要

地震動評価において、特定サイトにおける地盤増幅特性のばらつきを正確に評価することは極めて重要である。観測点直下の増幅特性を直接的に捉える指標である地表/地中スペクトル比 (Surface-to-Borehole Spectral Ratio; SBSR) は、同一地点においても地震イベントごとに無視できないばらつきを示すことが長年知られてきた。この事実は、1次元成層構造を仮定した理論応答が常に安定した伝達関数を与えることと矛盾し、強震動予測式 (Ground Motion Models; GMMs) における認識論的不確実性の主要因となってきた。

従来の GMM は、広域で観測された地震動の「空間的なばらつき」が、単一サイトで経験される「時間的なばらつき」と等価であるとする「エルゴード仮定」に基づいて構築されてきた。しかし、Anderson & Brune (1999)^[5-1]らが指摘するように、この仮定はサイト固有の系統的な応答特性まで平均化してしまうため、予測の不確実性を過大に評価する傾向がある。

近年では、この問題を克服するため、平均的な応答からのばらつきをサイトごとに評価する非エルゴード的アプローチに関する研究が進展している (例えば、Al Atik et al., 2010^[5-2]; Lavrentiadis et al., 2023^[5-3])。その代表的な試みとして、Rodriguez-Marek et al. (2011)^[5-4] (以下、RM2011) は、KiK-net データを用いて単一観測点におけるばらつき (Single-Station Sigma) を評価し、その低減可能性について論じている。

しかしながら、これら既往の非エルゴード的評価においても、以下の点は未だ十分には解明されていない。第一に、ばらつきの物理的要因の複雑さゆえに、その評価の多くが統計的な処理に留まっている点である。特に、観測されるばらつきの中に含まれる方位依存性について、RM2011 などはこれを伝播経路に起因するばらつきとして扱っており、サイト近傍の局所的な地盤構造に起因するサイト固有の特性として分離・評価するには至っていない。第二に、GMM の残差分析に基づく手法では、震源や伝播経路の影響を完全に排除することが難しく、これらがサイト増幅のばらつきとして混入している可能性が考えられる。

前章までに、SBSR に見られる方位依存性が、観測点近傍の物理的な不整形構造や地形効果に起因する現象であることを、数値解析を通じて演繹的に確認した。これらの変動は、従来の1次元理論の枠組みではばらつきとして処理されてきたが、適切なモデル化を行えば予測可能な認識論的不確実性へと分類され得るものである。

本章では、第2章で構築したデータベースを用い、この SBSR の変動を統計的に分析する。具体的には、観測された全変動 (地震間変動) を、地震波の到来方位に依存して再現性をもって現れる「系統的ばらつき」と、それ以外のランダムな要因による「偶然的ばらつき」の2成分に定量的に分離す

る手法を提案し、その適用結果について論じる。これにより、従来の手法では評価しきれなかったサイト内ばらつき（Single-Station Sigma）の内部構造を明確化することを目的とする。

5.2 解析対象データと処理

本検討では、第 2 章で構築した KiK-net の観測記録データベースを用いる。なお、本章では地盤の非線形化の影響を排除し、線形範囲内でのばらつき構造を議論するため、特に地表最大加速度（PGA）が $1\text{--}50\text{ cm/s}^2$ の範囲にあり、かつ気象庁マグニチュード（ M_j ）が 4.0 以上の記録を解析対象とした。また、スペクトル比の算出にあたっては、第 2 章と同様に Transverse 成分を使用し、平滑化等の処理も共通の手法を用いている。最終的に選定されたデータセットは、693 観測点における 6,973 地震、計 152,352 記録である。

5.3 ばらつきの要因分離手法

本研究では、単一観測点における SBSR の変動要因を定量的に分離するため、第 3 章で導入した類似した地震ペアを用いて震源・伝播経路特性を相殺するという枠組みを、ばらつきの統計的評価へと拡張する。第 3 章では、二重スペクトル比法に基づく物理的な変動要因の検証を目的として地震ペアを選定したが、本章ではこのペアリング手法を応用し、観測点ごとに特性の異なる 2 種類の地震ペア群（データセット）を構築する。そして、ある観測点における 2 つの地震イベント m, n 間の SBSR の変化を地震間比（ $SBSR_m(f)/SBSR_n(f)$ ）として定義し、各データセットにおけるこの指標の自然対数標準偏差を比較することで、ばらつきの成分分離を行う。

Dataset A : 同位置地震ペア

第 3 章におけるペア選定基準と同様に、震源間距離が 5 km 以内、かつマグニチュード差が 0.2 以内の地震ペアを選定する。このペアから到来する地震波は、ほぼ同一の伝播経路を経て、ほぼ同一の到来方位角および入射角でサイトに到達するため、ペア間で観測される SBSR の差異には、伝播経路特性やサイトの方位依存性の影響はほとんど含まれないとみなせる。したがって、このデータセットから得られる残存するばらつきは、震源の破壊過程の微細な違いや純粋なランダムノイズに起因するものと考えられ、これを本研究では「偶然的ばらつき（ ϕ'_0 ）」と定義する。

Dataset B : 到来方向が異なる地震ペア

震源距離およびマグニチュードの条件はデータセット A と同様（差が 5 km 以内、0.2 以内）とした上で、到来方位角の差が 45 度以上となる地震ペアを選定する。この条件は、第 3 章で確認された「サイトの方位依存性」が SBSR の変動に与える影響を最大限に顕在化させるために設定したものである。このデータセットから得られるばらつきは、サイトの方位依存性の影響を十分に含んだ「全ばらつき（ ϕ'_{AMP} ）」に相当する。

系統的ばらつきの算出

両データセットから算出されるばらつきが統計的に独立であると仮定し、分散の加法性に基づき、方位角に依存する「系統的ばらつき (ϕ'_{az})」を次式により算出する。

$$\phi'_{az} = \sqrt{\phi_{AMP}'^2 - \phi_0'^2} \quad \text{式 (5-1)}$$

各地震ペア選定方法の模式図を図 5-1 に示す。

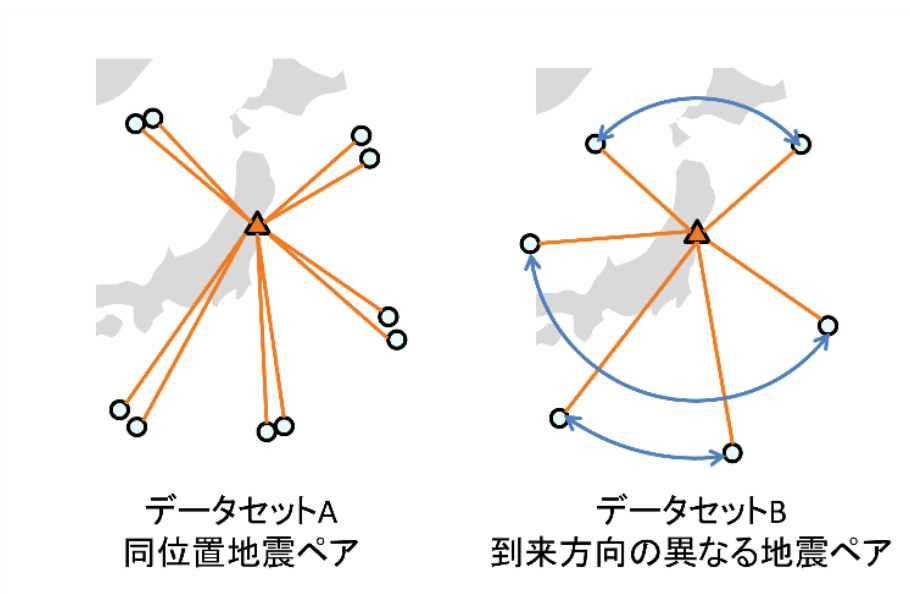


図 5-1 各地震ペアデータセットの模式図

5.4 解析結果と考察

5.4.1 ばらつきの成分分解

Dataset A（同位置ペア）および Dataset B（異方位ペア）において 10 以上の地震ペアを確保できた 503 観測点を対象に、ばらつきの成分分離を行った。図 5-2 に、分離された (a) 偶然的ばらつき、(b) 全ばらつき、(c) 系統的ばらつきの中央値および四分位範囲（IQR）の周波数特性を示す。

解析の結果、全周波数帯域において、偶然的ばらつき (ϕ'_0) と系統的ばらつき (ϕ'_{az}) の中央値は、概ね同程度のレベルで推移していることが確認された。これは、単一観測点のばらつき (Single-Station Sigma) を低減させる上で、ランダムな事象としての扱いを受け入れてきた成分のうち、約半分が物理的に説明可能な系統的成分である可能性を示唆している。ここで分離された系統的ばらつき (ϕ'_{az}) は、SBSR の到来方向依存性を定量化した指標である。図 5-2 (c)において、その中央値は周波数とともに緩やかに増加する傾向が見られるが、特筆すべきはその四分位範囲（IQR）の広さである。IQR の下限に近いサイトでは系統的ばらつきが小さく、1 次元成層構造に近い挙動を示していると考えられる一方で、上限に近いサイトでは極めて大きな系統的ばらつきを有している。このばらつきの大きさは、盆地端部や埋没谷といった地下の 3 次元的地盤構造の複雑さ、あるいは急峻な地形によるサイト増幅の異方性を反映していると考えられる。すなわち、 ϕ'_{az} の値そのものが、そのサイトが 1 次元的な仮定からどれだけ逸脱しているかを表す不整形度の指標として解釈可能である。

一方、Dataset A から得られた偶然的ばらつき (ϕ'_0) については、以下の点に留意する必要がある。本手法では、震源距離 5km 以内、 M_j 差 0.2 以内という基準でペアリングを行っているものの、その残差には純粋なランダムノイズだけでなく、未説明の系統的要因が残存している可能性がある。具体的には、発震機構（メカニズム解）の差異による放射パターンの変化や、強震動入力履歴に伴う地盤物性の経時変化^[5-5]（非線形化からの回復過程等）、偶然的ばらつきが方位依存性を有することなどが考えられる。したがって、本研究で算出された ϕ'_0 は、予測不可能な不確実性の上限值を示していると捉えるのが妥当である。各方位で同位置地震ペアのばらつきが算出可能なほどの観測記録の拡充、震源情報の高度化により、さらに低減できる余地を残している。

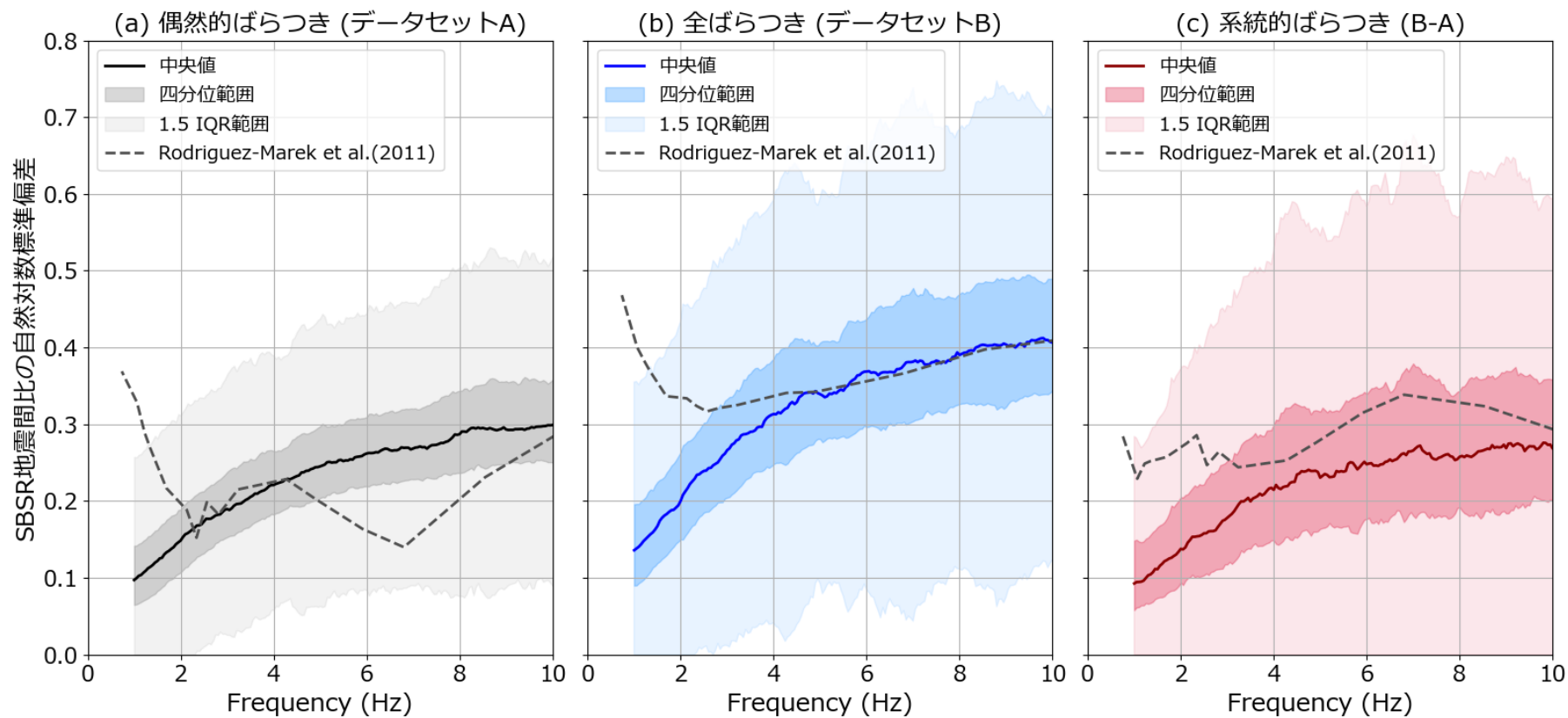


図 5-2 SBSR に見られるばらつきの成分分解

5.4.2 既往研究との比較と考察

本手法の妥当性および得られたばらつきの質的評価を行うため、KiK-net の地表地震記録および地中地震記録を用いてサイト内ばらつきを評価した代表的な既往研究である RM2011 の結果との詳細な比較を行う。

まず、比較対象として図 5-2 に示した RM2011 の評価値（破線）の定義について述べる。RM2011 では、地表および地中記録の加速度応答スペクトル（5%減衰）に基づく強震動予測式（GMM）の残差分析を行っており、図中の破線は以下の手順で本研究の定義に対応づけたものである。なお、RM2011 においてサイトパラメータは、AVS30, V_s が 800m/s に達する深さ(h800), 地中地震計が設置されている深さでの V_s (Vshole)でコントロールされている。また本研究は 2 地震間の比（地震間変動）を対象としているため、RM2011 で算出された標準偏差を $\sqrt{2}$ 倍してスケールを合わせている。

全ばらつき（図 5-2(b)）

RM2011 におけるサイト増幅の偶然的ばらつき（ ϕ_{AMP} ）を採用している。RM2011 において、 ϕ_{AMP} は地表での地震動の全標準偏差が、どのような要素（震源、深部地盤、浅部地盤の増幅など）によって構成されているかを分解して示したものである。地中での地震動のばらつき全標準偏差を基に分解されていることから、本検討の全ばらつきとよく対応していると考えられる。

系統的ばらつき（図 5-2(c)）

RM2011 では、サイト項の方位依存性を直接モデル化していないが、全方位を対象とした Single-Station Sigma (ϕ_{SS})と、到来方位を狭い範囲（例えば 10 度）に限定した場合の Single-Station Sigma ($\phi_{SS,10^\circ}$)の比較を行っている。そこで本比較においては、全方位のばらつき ϕ_{SS} と方位限定のばらつき $\phi_{SS,10^\circ}$ の差分（分散の差の平方根）を算出し、これを RM2011 のデータから推定される方位に起因する系統的ばらつき（ ϕ_{az} ）」と定義した。

偶然的ばらつき（図 5-2(a)）

上記で求めた全ばらつき（ ϕ_{AMP} ）から、系統的ばらつき（ ϕ_{az} ）を差し引いた成分として算出した。これは RM2011 の枠組みにおいて、方位依存性を除去した後に残る純粋なランダム成分（ ϕ'_0 相当）に対応する。

これらの定義に基づき比較を行うと、まず全ばらつき（図 5-2 (b)）において、4 Hz 以上の高周波数帯域では両者は比較的良い一致を示している。しかし、4 Hz 以下の低周波数帯域、特に 1-2 Hz 付近において、RM2011 の評価値は本研究の結果よりも顕著に大きな値を示している。この乖離の主たる要因は、分離手法の違いにあると考えられる。GMM を用いる RM2011 のアプローチでは、震源特性や伝播経路特性のモデル化誤差（地震間残差 τ やパス項のばらつき）を完全には分離できず、それらがサイト内ばらつき（ ϕ_{AMP} ）として混入している可能性が高い。特に、RM2011 が地中記録のばらつき等を参照して推定していることから、地中深部より下のパスや震源の影響を含んでいることが推察される。対して本研究では、同一観測点における地震ペアの比をとることで、震源・伝播経路の共通項を相殺しているため、より純粋にサイト近傍に起因するばらつきのみを抽出できているといえる。

次に、系統的ばらつき（図 5-2 (c)）について考察する。RM2011 から推定した ϕ_{az} （全方位と方位限定の差分）は、本研究における ϕ'_{az} の中央値と比較して、全般的に大きい値を示している。RM2011 の文脈では、方位を限定することで低減されるばらつきは、主に伝播経路（パス）の違いによるもの（ ϕ_{P2P} ）として解釈されることが多い。しかし、本研究の第 4 章で示した通り、SBSR の方位依存性はサイト直下の局所的な不整形構造に強く支配されている。すなわち、RM2011 においてパスのばらつきとして捉えられていた成分の中には、実際にはサイト近傍の応答特性の方位依存性が相当量含まれていると解釈できる。

以上の比較から、本研究で提案した SBSR のペア解析手法は、従来の GMM 残差分析に比べ、サイト固有の系統的ばらつきと偶然的ばらつきをより高精度に分離・特定できる手法であることが確認された。

5.5 まとめ

本章では、第 4 章までに物理的実体が確認された SBSR の方位依存性を統計的に評価するため、KiK-net の膨大な観測記録を用いたばらつきの要因分離手法を提案し、その適用結果について論じた。本章で得られた知見は以下の通りである。

ばらつきの分離手法の確立

震源位置が近接する「同位置地震ペア」と、到来方位が異なる「異方位地震ペア」の変動幅の差異に着目することで、SBSR の全変動を「偶然的ばらつき」と「系統的ばらつき」に定量的に分離する枠組みを構築した。

系統的ばらつきの寄与度

解析の結果、系統的ばらつきと偶然的ばらつきは同程度の大きさを示し、サイト内ばらつきの約半分は、到来方位に依存する再現性のある成分であることが明らかとなった。これは、適切な物理モデル（不整形地盤モデル等）を導入することで、将来の予測における不確実性を大幅に低減できる可能性を示している。

系統的ばらつきの物理的解釈

系統的ばらつきの大きさはサイトごとに大きく異なり、この値がサイト周辺の 3 次元的な地盤構造や地形の複雑さを表す指標となり得ることが示唆された。

既往研究との関係性の整理

Rodriguez-Marek et al. (2011) との比較分析を通じ、従来の手法ではパスごとのばらつきとして処理されていた成分の中に、本研究が対象とするサイト近傍の不整形性に起因する系統的ばらつきが多分に含まれていることを明らかにした。

以上の結果は、これまで偶然的ばらつきとして一括りにされてきた **Single-Station Sigma** の内部構造を解明するものである。次章では、ここで抽出された系統的ばらつきと、実際の地形・地質データとの定量的な関係性を分析し、観測記録のない地点においてもばらつきを推定可能な簡易評価手法の構築を試みる。

第 5 章の参考文献

- [5-1]Anderson, J. G., & Brune, J. N. (1999). Probabilistic seismic hazard analysis without the ergodic assumption. *Seismological Research Letters*, 70(1), 19-28. doi:10.1785/gssrl.70.1.19.
- [5-2]Al Atik, L., Abrahamson, N., Bommer, J. J., Scherbaum, F., Cotton, F., & Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters*, 81(5), 794-801. doi:10.1785/gssrl.81.5.794.
- [5-3]Lavrentiadis, G., Abrahamson, N. A., & Kuehn, N. M. (2023). A non-ergodic effective amplitude ground-motion model for California. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(11), 5233-5264. doi:10.1007/s10518-021-01206-w.
- [5-4]Rodriguez-Marek, A., Montalva, G. A., Cotton, F., & Bonilla, F. (2011). Analysis of single-station standard deviation using the KiK-net data. *Bull Seismol Soc Am*, 101(3), 1242-1258. doi:10.1785/0120100252
- [5-5]澤崎郁 (2017) 大地震に伴う地下構造変化とその回復過程について, 地震 第 2 輯, 70, 57-79. doi:10.4294/zisin.2016-19.

第 6 章 変動要因の感度解析と簡易評価手法の提案

6.1 概要

前章では、地表/地中スペクトル比（SBSR）の変動を、到来方位に依存しない「偶然的ばらつき」と、方位依存性を有する「系統的ばらつき」に分離し、両者が同程度の寄与を持つことを明らかにした。本章では、これらのばらつきがどのような物理的要因（地盤物性、地形、周波数特性など）に支配されているかを分析し、観測記録のない地点においてもばらつきの大きさを推定可能な簡易評価手法の構築を試みる。

具体的には、偶然的ばらつきについては地盤の卓越周波数に着目した正規化を行い、その特性をモデル化する。一方、系統的ばらつきについては、地形・地質パラメータを用いた機械学習（LightGBM）による感度解析を実施し、変動を支配する主要な要因を特定する。さらに、特定された重要パラメータを用いて観測点をクラスタリングすることで、サイト特性の不確実性を簡易に予測する手法を提案する。

6.2 偶然的ばらつきの周波数特性とモデル化

6.2.1 卓越周波数による正規化

第 5 章で抽出された偶然的ばらつき（ ϕ'_0 ）の周波数特性を詳細に分析するにあたり、サイト固有の共振特性との関連に着目する。

サイト増幅特性のばらつきに関する近年の研究として、Zhu et al. (2022)⁶が挙げられる。彼らは、KiK-net および K-NET の観測記録^[6-2]を用い、単一観測点における H/V スペクトル比の標準偏差（ $\sigma_{HV,S}$ ）を評価した。その中で、SBSR のばらつき（ $\sigma_{SB,S}$ ）が、サイトの基本共振周波数（ f_0 ）を境界として明瞭に変化することを示している。具体的には、SBSR から同定した f_0 を用いて周波数軸を正規化（ f/f_0 ）した分析を行い、 $f < f_0$ の帯域ではばらつきが極めて小さく、 $f > f_0$ の帯域ではばらつきが増大するという傾向を報告している。なお、 $\sigma_{HV,S}$ が SBSR のサイト内ばらつきを近似できる有用な指標であることを示すとともに、ばらつきの大きさがサイトの地盤条件（AVS30 や卓越周波数）や地形の不整形さに依存することを統計的に明らかにした。特に、特定の周波数帯域におけるばらつきが、そのサイトの共振周波数と密接に関連して変動することを示唆している。

本研究における偶然的ばらつき（ ϕ'_0 ）についても、Zhu et al. (2022)⁶のアプローチを参考にし、各サイトの卓越周波数（ f_0 ）に着目した。図 6-1 に、各サイトの地表-地中間の平均 S 波速度（AVS_{hole}）および地中地震計設置深度から 1/4 波長則により算出した卓越周波数 f_0 ごとに平均した偶然的ばらつき（ $\phi'_0(f)$ ）を示す。 f_0 は各サイトで平均的な SBSR が 1 次のピークを持ちやすい周波数として定義される。 f_0 のカテゴリごとに、 f_0 以下の低周波数帯域でのばらつきが小さくなる様子が見られ、Zhu et al. (2022)⁶と同様の偶然的ばらつきが f_0 に依存する共通した傾向があることが示唆された。

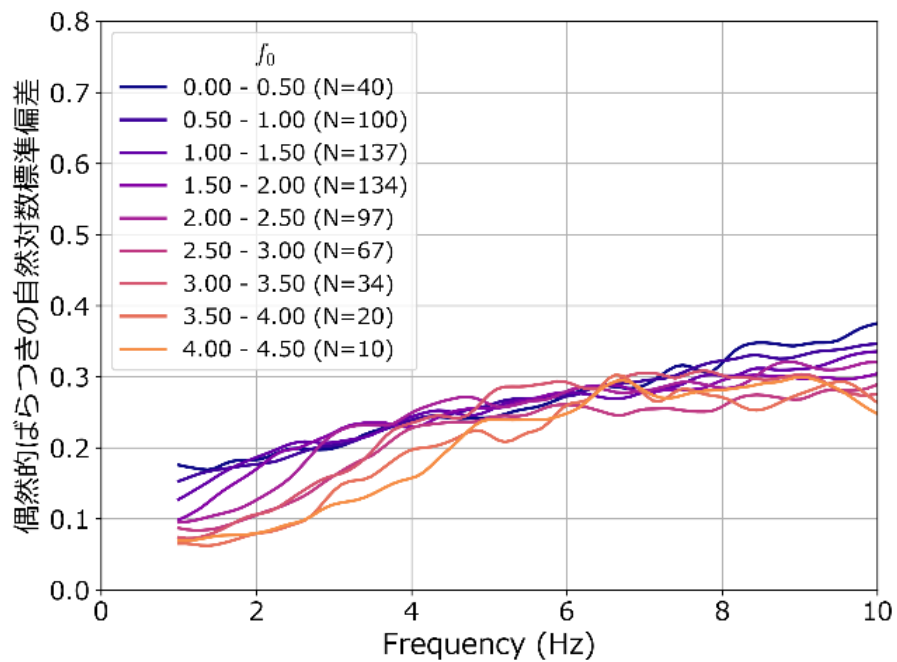


図 6-1 f_0 カテゴリごとの偶然的ばらつき $\phi'_0(f)$

そこで、各サイトに固有の地盤特性を規格化するため、Zhu et al. (2022)⁶を参考に正規化周波数 (f/f_0) を導入した。図 6-2 に、正規化周波数で偶然的ばらつき $\phi'_0(f/f_0)$ を f_0 ごとに平均した結果を示す。なお図中の点線は、平均処理時に観測点数が 10 を下回った正規化周波数帯を示す。正規化された偶然的ばらつきは、サイトの地理的な位置によらず、類似した形状を示すことが明らかになった。 $f/f_0 < 1$ の低周波数帯ではどのカテゴリでも共通した標準偏差を示し、 $f/f_0 \approx 1$ 付近から正規化周波数とともに増加しはじめるような形状である。 $f/f_0 = 1$ では、0.15 程度、 $f/f_0 = 2 \sim 3$ では 0.15～0.3 程度の標準偏差となった。 $f/f_0 > 1$ の帯域においては全ての偶然的ばらつきが収束するわけではなく、ばらつきの絶対値はサイトごとに依然として異なっている。特に、 f_0 が高周波数になるにつれて絶対値および傾斜が大きくなっている。これは、例えば $f_0 = 4.5\text{Hz}$ の場合、 $f/f_0 = 3$ の時に 13.5Hz の標準偏差を見ていることになり、 f_0 が低い場合に比べ、より短波長の複雑な現象を含んでいることが要因として考えられる。偶然的ばらつきの形状は共通した傾向を示す一方、その大きさはサイト固有の何らかの特性に依存することを示唆している。

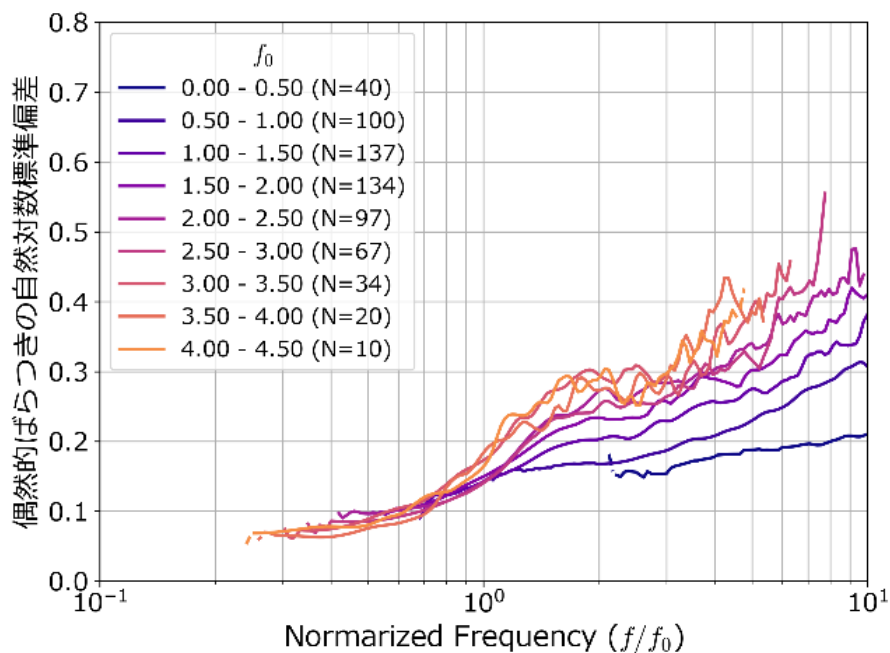


図 6-2 f_0 カテゴリごとの正規化した偶然的ばらつき $\phi'_0(f/f_0)$

6.2.2 偶然的ばらつきの共通特性

正規化を行った結果、偶然的ばらつきの周波数特性はサイトの地理的な位置によらず、類似した共通の形状に収束することが明らかになった。具体的には以下の特徴が確認される。

低周波数域の安定性

$f/f_0 < 1.0$ の帯域では、ばらつきは 0.1 程度（自然対数標準偏差）と低く、かつ安定している。これは、一次共振周波数より長周期側の帯域では、地盤が比較的線形かつ単純な挙動を示し、ランダムな変動が入り込みにくいことを示唆している。

共振点付近からの増大

$f/f_0 \approx 1.0$ 付近から、正規化周波数の増加とともにばらつきが増大し始め、 $f/f_0 = 2 \sim 3$ の範囲では 0.2～0.3 程度に達する。

高周波数域の分散

$f/f_0 > 1.0$ の帯域では全体として増加傾向にあるものの、絶対値は f_0 が高い（地盤が硬い、または層厚が薄い）サイトほど大きくなる傾向が見られた。これは短周期成分ほど、微細な地盤不均質性の影響を受けやすいためと考えられる。

以上の結果より、偶然的ばらつきについては、サイト固有の f_0 さえ把握できれば、その周波数特性（スペクトル形状）をある程度の精度で標準モデルとして予測可能であることが示された。

6.3 機械学習を用いた系統的ばらつきの感度解析

6.3.1 系統的ばらつきの指標化

本研究において抽出された系統的ばらつきは、理論的には地下の不整形構造や急峻な地形に起因する 2D/3D 的な波動伝播効果（散乱・回折・フォーカシング等）を反映していると考えられる。したがって、このばらつきの大きさは、地形の起伏や複雑さを示す物理指標と何らかの強い相関を持つことが期待される。

この仮説を検証するため、まず系統的ばらつきの大きさを単一の数値として指標化することを試みた。指標の定義にあたっては、地盤の増幅特性において最も支配的な 1 次卓越周波数周辺の挙動に着目することとした。ここで、1 次卓越周波数の特定に際して、SBSR のピークを直接用いることは避けた。SBSR は、地中地震計の設置深度における上り波と下り波の干渉の影響を受け、本来の地盤特性とは異なる見かけ上のピーク（擬似共振）を生じる場合があり [6-3]、真の共振周波数の判定が困難になるためである。かわりに、本検討では観測された地震波水平/上下スペクトル比（Earthquake Horizontal-to-Vertical spectral Ratio; EHVR）を採用した。EHVR のピーク周波数は、理論的な地盤伝達関数 (2E/2E) のピーク周波数と良好に対応することが知られており [6-4]、サイト固有の共振特性を捉えることが可能である。なお、EHVR の 1 次ピーク周波数の抽出は、Tao & Rathje (2020) [6-3] を参考に欧州の常時微動観測ガイドライン（SESAME） [6-5] に準拠した。

評価対象とする周波数帯域の設定については、地盤モデルの不確実性が応答に与える影響を評価した Barani et al. (2013) [6-6] の知見を参考にした。彼らはモンテカルロ・シミュレーションにより、地盤物性の不確実性に伴う地盤応答 (2E/2E) のピーク周波数の変動幅を定量評価している。この知見に基づき、本研究では EHVR から特定したピーク周波数を中心とする ± 1.5 Hz の範囲を、工学的に重要な評価対象帯域として設定した（図 6-3）。そして、この帯域内において、第 5 章で評価した全ばらつき (ϕ'_{AMP}) の平均値 $\overline{\phi'_{AMP}}$ から偶然的ばらつき (ϕ'_0) の平均値 $\overline{\phi'_0}$ を差し引いた値を、そのサイトにおける方位依存性に起因する系統的ばらつき (ϕ'_{az}) の代表値 $\overline{\phi'_{az}}$ と定義した。

$$\overline{\phi'_{az}} = \sqrt{\overline{\phi'_{AMP}}^2 - \overline{\phi'_0}^2} \quad \text{式 (6-1)}$$

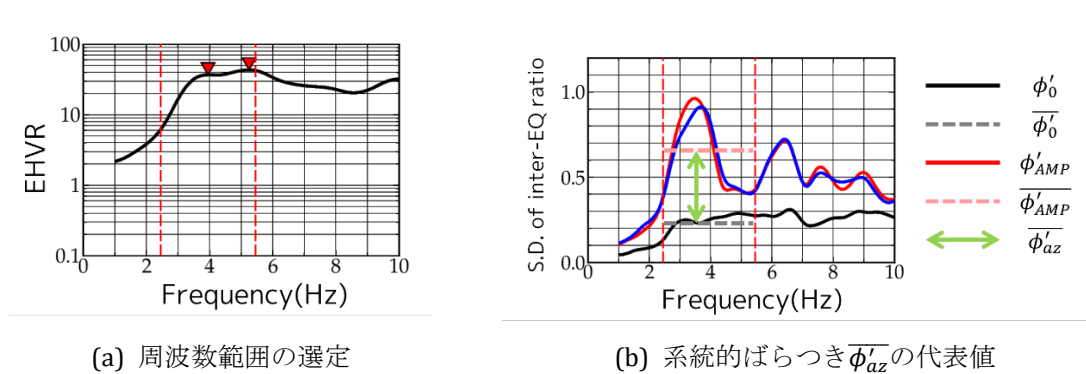


図 6-3 系統的ばらつきの指標化手順（MYGH13 観測点の例）

6.3.2 サイトパラメータと系統的ばらつきの単変量解析

次に、算出された系統的ばらつきの代表値と、PS 検層から得られる S 波速度やインピーダンス比などの物性指標や各種地形指標のサイトパラメータとの関係を分析した。

まず、比較対象としたサイトパラメータについて説明し、それぞれ系統的ばらつきとの散布図の一覧を図 6-4 に示す。なお、下記のフォーマットに従う。

サイトパラメータ名：本文での略記（図表内での略記）

サイトパラメータに関する説明。

標高：EL (EL)

地表地震計設置地点の標高。KiK-net 観測点については、観測点情報として公開されている。

地中地震計深さ： H_{hole} (depth)

地中地震計が設置されている場所の地表からの深さ。KiK-net 観測点については、観測点情報として公開されている。

最表層層厚： H_{surf} (SurfTick)

PS 検層の最表層の層厚。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

最表層の卓越周波数： $f_{0,surf}$ (f0_SurfLayEL)

PS 検層の最表層の S 波速度と層厚を用いて、1/4 波長則から算出する卓越周波数。1/4 波長則は下式の通り。

$$f_0 = \frac{Vs}{4H} \quad \text{式 (6-2)}$$

f_0 は卓越周波数(Hz)、 Vs は S 波速度(m/s)、 H は層厚(m)を示す。

地中地震計設置深度における S 波速度： Vs_{hole} (Vs_{hole})

地中地震計が設置されている基盤の S 波速度で、PS 検層結果から抽出できる。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

PS 検層による 30m 平均 S 波速度： $AVS30_{PS}$ (AVS30)

表層 30m の平均 S 波速度で、第 2 章に示した通り以下の式で計算される。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

$$AVS30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / Vs_i} \quad \text{式 (6-3)}$$

PS 検層による 10m 平均 S 波速度 : $AVS10_{PS}$ ($AVS10$)

表層 10m の平均 S 波速度で、式 (6-3) と同様の式で計算される。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地表-地中間平均 S 波速度 : AVS_{hole} (AVS_{hole})

地表から H_{hole} までの平均 S 波速度で、式 (6-3) と同様の式で計算される。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

基盤との S 波速度コントラスト : R_{base} (Vs_{hole}/AVS_{hole})

基盤とのインピーダンス比に類する指標。インピーダンス比は増幅特性のピーク振幅を支配するパラメータであることから、本指標を導入した。 H_{hole} を基準とし、以深を基盤、以浅を堆積層と単純化した場合のインピーダンス比を想定している。 Vs_{hole}/AVS_{hole} から算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地盤内の平均 S 波速度コントラスト : R_{AVS} ($AVS_{hole}/AVS10$)

地表ー地中地震計間での平均的なインピーダンス比を確認するための指標。 $AVS_{hole}/AVS10_{PS}$ から算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地盤内の S 波速度コントラスト : R_{VS} ($Vs_{hole}/AVS10$)

地中地震計以浅でのインピーダンス比を確認するための指標。 $Vs_{hole}/AVS10_{PS}$ から算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

S 波速度コントラスト最大層での卓越周波数 : $f_{0,Rmax}$ ($f0_ImpedanceMaxVS$)

PS 検層結果から、S 波速度のコントラストが最も大きい層を対象に、その層以浅の平均 S 波速度と層厚を用い、1/4 波長則により卓越周波数を算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

平均 S 波速度コントラスト最大層での卓越周波数 : $f_{0,ARmax}$ ($f0_ImpedanceMaxAVS$)

PS 検層結果を基に地表ー地中地震計間の S 波速度構造を 2 層に単純化したとき、速度コントラストが最大になる 2 層構造で卓越周波数を計算する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地表ー地中間平均 S 波速度による卓越周波数 : $f_{0,S}$ ($f0_S$)

AVS_{hole} と H_{hole} から計算される地表ー地中地震計間の卓越周波数。1/4 波長則を用いて算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地表－地中間平均 P 波速度による卓越周波数： $f_{0,P}$ ($f0_P$)

平均 P 波速度 AVP_{hole} と H_{hole} から計算される地表－地中地震計間の卓越周波数。1/4 波長則を用いて算出する。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

地表－地中間平均 S 波速度と平均 P 波速度の比： v_{AVS} (AVP_{hole}/AVS_{hole})

平均 S 波速度に対する平均 P 波速度の比で、ポアソン比に類する指標として採用した。KiK-net 観測点のうち、PS 検層結果が公開されている観測点に限られる。

J-SHIS による 30m 平均 S 波速度： $AVS30_{JSHIS}$ (JSHIS-AVS30)

$AVS30_{PS}$ と同じ指標であるが、防災科学技術研究所による J-SHIS^[6-7] が表層地盤情報として全国で 250m メッシュ毎に公開している。微地形区分を基に推定した値であるため、 $AVS30_{PS}$ より精度はやや落ちることが考えられるが、PS 検層等が未調査の地点でも使用可能な汎用性の高さから採用した。

Topographic Position Index： TPI (TPI)

地表の標高に関する指標で、周辺の標高の中央値と対象地点の標高 (EL) の差分から算出される。本検討では、250m の範囲での中央値と比較した。標高データは、国土地理院の数値標高 (DEM10B)^[6-8] を使用した。比高とも呼ばれ、正の時は周辺より高地、負の時は周辺より低地に位置する。公開情報から任意の場所で使用可能である。

250m 範囲の尾根谷度： RVD (RVD-250m)

尾根谷度は、地上開度と地下開度との関係から傾斜の値と独立した尾根か谷かを示す指標として、対象地点と地形断面上の点を結ぶ直線の角度の最大値と最低値の平均値として定義されている^[6-9]。北から 45° 間隔の 8 方位に対して尾根谷度を算出し、その平均値を取ることから、3 次元的な地形変化を反映する指標として採用した。本検討では、250m の範囲に対して尾根谷度を計算しており、標高データは国土地理院の数値標高 (DEM10B) を使用した。公開情報から任意の場所で使用可能である。

$$RVD = \frac{OGO - UGO}{2} \quad \text{式 (6-4)}$$

尾根谷度の方位標準偏差： $S.D._{RVD}$ (S.D.RVD-250m)

尾根谷度を算出する際、北から 45° 間隔の 8 方位の平均を取るが、その際の標準偏差から、起伏の激しさを表す指標として採用した。公開情報から任意の場所で使用可能である。

地下開度： UGO (UGO)

地下開度は、天底と地形断面の下側接線の角度を表す。公開情報から任意の場所で使用可能である。

地上開度： OGO (OGO)

地上開度は、天頂と地形断面の上側接線の角度を表す。公開情報から任意の場所で使用可能である。

地中地震計深さと同距離範囲の尾根谷度： RVD_{dep} (RVD-depx1)

尾根谷度の計算範囲を H_{hole} と同じ距離とした時の指標。公開情報から任意の場所で使用可能である。

J-SHIS 深部地下構造の最大傾斜角： $Slope_{JS,max}$ (JSDchiltMax)

J-SHIS の深部地下構造モデルを基に算出する、層の傾斜角に関する指標。地表から地震基盤の間で、傾斜が最大となる層の傾斜角を採用する。傾斜角は隣接メッシュの層下端深さをを用い、以下の式から算出した。

$$Slope = \frac{360}{2\pi} \times \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{D_E - D_W}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{D_N - D_S}{2\Delta x}\right)^2} \right) \quad \text{式 (6-5)}$$

D_E は西隣り， D_E は東隣り， D_N は北隣り， D_S は南隣りのメッシュにおける層下端深さを表す。公開情報から任意の場所で使用可能である。

J-SHIS 深部地盤構造の最表層の傾斜角： $Slope_{JS,surf}$ (JSDchilt_Surf)

J-SHIS 深部地盤構造モデルにおける最表層の下面境界の傾斜角。公開情報から任意の場所で使用可能である。

J-SHIS 深部地盤構造において地中地震計深度に該当する層の傾斜角： $Slope_{JS,hole}$ (JSDchilt_hole)

J-SHIS 深部地盤構造モデルにおける対象地点の地中地震計設置深さに該当する層の上面境界の傾斜角。公開情報から任意の場所で使用可能である。

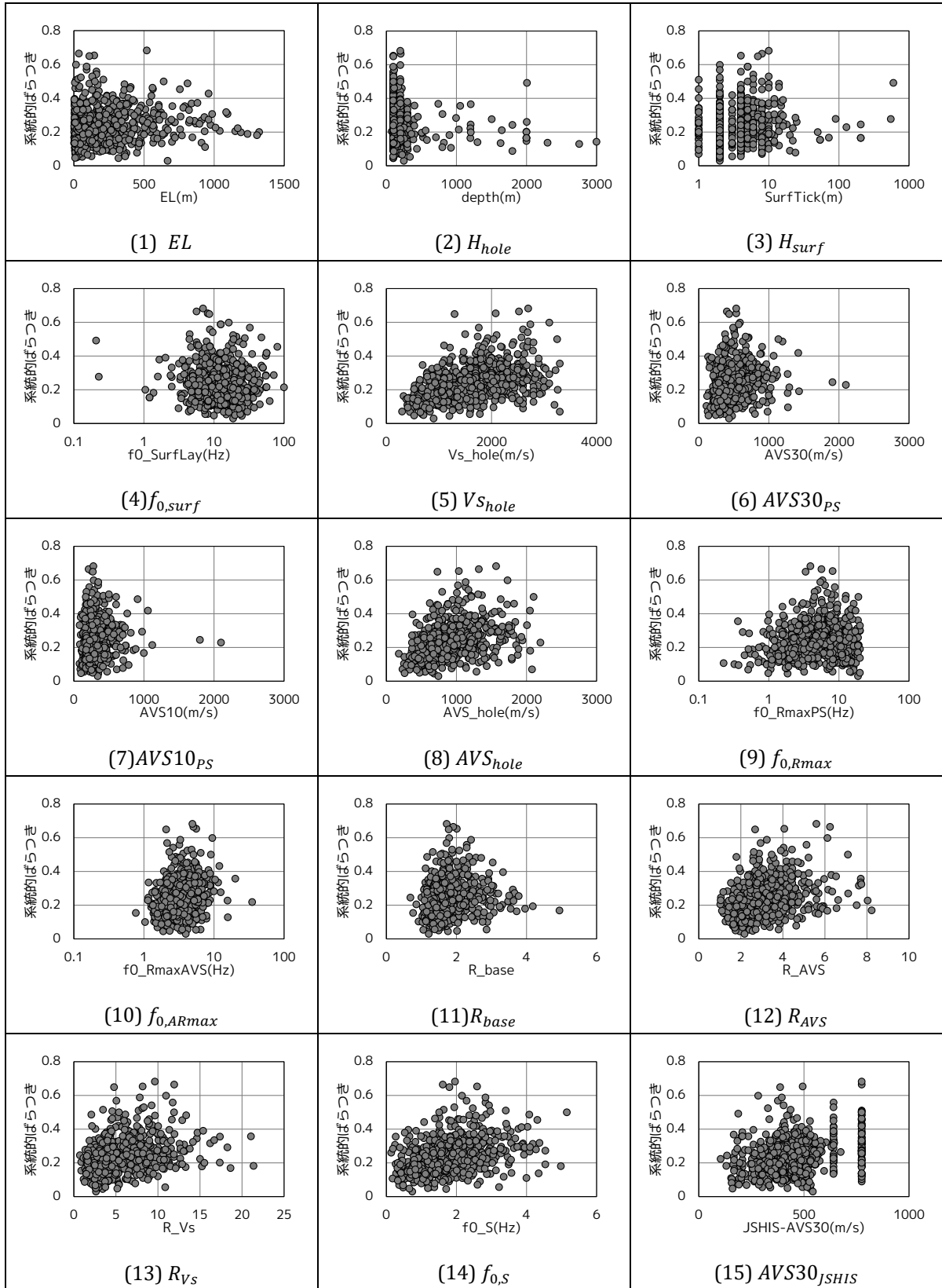


図 6-4 サイトパラメータと系統的ばらつきの代表値 ϕ'_{az} の相関図

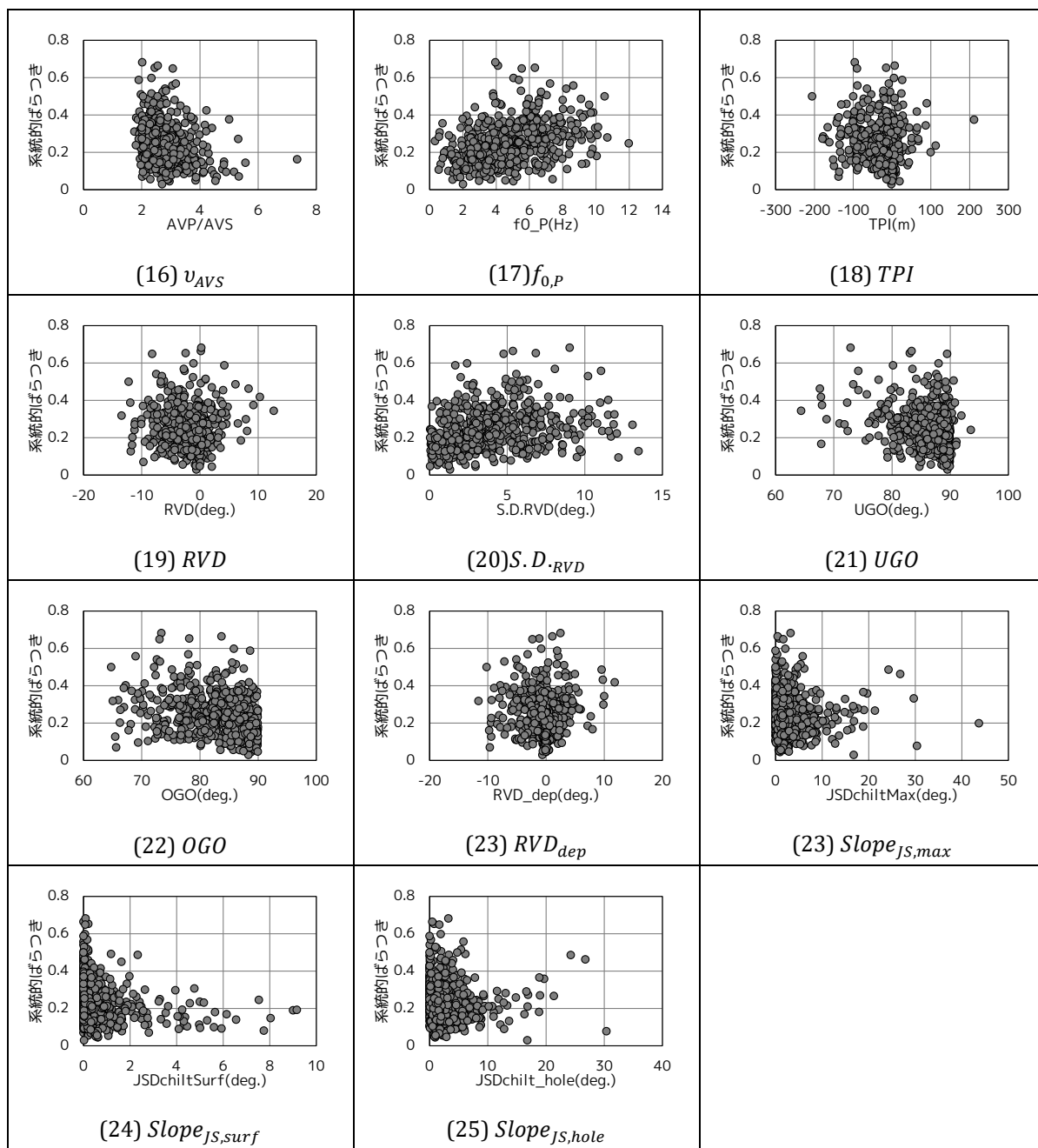


図 6-4 サイトパラメータと系統的ばらつきの代表値 ϕ_{az}^T の相関図（続き）

個別のパラメータとの相関を確認した結果、両者の間には「S 波速度が大きいほどばらつきが大きい」といった大まかな傾向は見られるものの、観測点ごとのばらつきの大小を明瞭に説明・分類できるほどの明確な関係性は見出せなかった。この結果は、系統的ばらつきを生じさせる物理現象が、単一のサイトパラメータのみで記述できるほど単純ではなく、地形の凹凸、地盤の硬軟、インピーダンス比など、複数の要因が複雑に絡み合った相互作用として現れていることを示唆している。

6.3.3 機械学習を用いた感度解析

このような単純な指標比較では系統的ばらつきを表現できないことを踏まえ、本検討では複数のパラメータが非線形に作用する複合的な効果を解明するため、機械学習を用いた多変量解析を導入することとした。サイト特性の評価において機械学習を活用する試みは近年進展しており、例えば Bahrampouri & Rodriguez-Marek (2023)^[6-10]は、サポートベクターマシン (SVM) を用いて多数の地形・地質パラメータから 1 次元地盤応答解析の適用性を判別するモデルを構築し、多次元の特徴量空間での評価の有効性を示している。

そこで本研究では、決定木ベースの勾配ブースティング手法である LightGBM を採用する (図 6-5)。この手法は、変数間の複雑な相互作用や非線形性を考慮した樹形モデルを構築できるため、ある条件下において、どのパラメータが支配的になるかという複雑な分岐構造を捉えるのに適している。本節では、この LightGBM を用いた感度解析により、これまで単変量解析では不明瞭であった系統的ばらつきの支配要因を、全パラメータの影響度という観点から定量的に明らかにすることを目的とする。なお、LightGBM は、Python ライブラリの lightgbm^[6-11]を使用した。

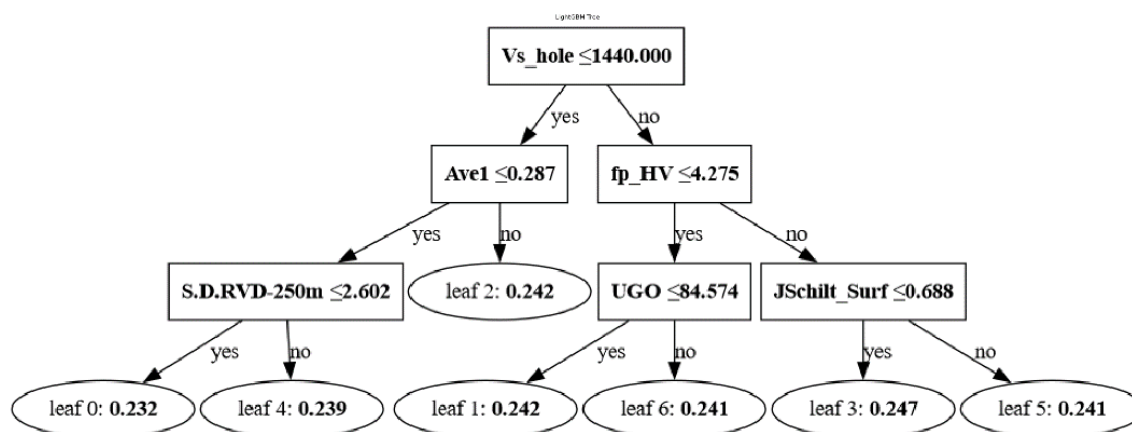


図 6-5 LightGBM の樹形モデルの例

6.3.4 解析条件と使用データ

感度解析の目的変数には、6.3.1 節の系統的ばらつきの代表値 ($\overline{\phi'_{az}}$) を設定し、説明変数 (特徴量) には 6.3.2 節のサイトパラメータを採用した。サイトパラメータは以下の 3 つのカテゴリに属しており、情報の入手に係るコストに応じて分類した。表 2-1 にパラメータとカテゴリの対応表を示す。

- ・公開情報から取得可能なパラメータ (コスト低, 表中緑色)
- ・PS 検層の物性値情報から算出可能なパラメータ (コスト中, 表中赤色)
- ・地震観測記録から算出 (コスト高, 表中青色)

なお、LightGBM を含む決定木ベースのアルゴリズムは、学習時の乱数シードや初期条件によって生成されるモデル構造が変化する性質を持つ。この変動は、特に説明変数の説明力が弱く、決定係数が小さいモデルにおいて顕著に現れる傾向がある。実際、予備検討として数ケースの学習を実施したところ、検証データに対する決定係数 (R^2) は 0.25~0.40 程度にとどまり、単一の予測モデルとして使用するには精度が不十分であることが確認された。しかし、本解析の主目的は系統的ばらつきの値を精密に予測することではなく、その変動を支配するパラメータの感度を相対的に評価することにある。そこで本検討では、単一モデルの不安定性を排除するため、乱数シードやハイパーパラメータをランダムに変化させた 500 通りのモデルを作成するアンサンブル的なアプローチを採用した。

説明変数の影響度評価には、SHAP (SHapley Additive exPlanations) 値^[6-12]を用いた。SHAP 値は、協力ゲーム理論における Shapley 値の概念を機械学習に応用したものであり、予測値に対して各特徴量がどの程度寄与したかを定量的に配分する指標である。最終的な支配要因の特定にあたっては、作成した 500 モデルのそれぞれから得られた SHAP 値を、各モデルの決定係数で重み付け平均する処理を行った。これにより、精度の低いモデルの影響を低減しつつ、ロバストに感度の高いパラメータを抽出することとした。なお、SHAP 値の計算には Python ライブラリの shap^[6-12]を使用した。

表 6-1 機械学習における説明変数一覧

標高 EL	地中地震計深さ H_{hole}	最表層層厚 H_{surf}	最表層の卓越周波数 $f_{0,surf}$	地中地震計設置深度に おける S 波速度 V_{Shole}
PS 検層による 30m 平均 S 波速度 $AVS30_{PS}$	PS 検層による 10m 平均 S 波速度 $AVS10_{PS}$	地表-地中間平均 S 波速度 AVS_{hole}	基盤との S 波速度 コントラスト R_{base}	地盤内の平均 S 波速度 コントラスト R_{AVS}
地盤内の S 波速度 コントラスト R_{VS}	S 波速度コントラスト 最大層での卓越周波数 $f_{0,Rmax}$	平均 S 波速度コントラスト最 大層での卓越周波数 $f_{0,ARmax}$	地表-地中間平均 S 波速度に よる卓越周波数 $f_{0,S}$	地表-地中間平均 P 波速度に よる卓越周波数 $f_{0,P}$
地表-地中間平均 S 波速度と 平均 P 波速度の比 v_{AVS}	J-SHIS による 30m 平均 S 波速度 $AVS30_{JSHIS}$	Topographic Position Index TPI	250m 範囲の尾根谷度 RVD	尾根谷度の方位標準偏差 $S.D.RVD$
地下開度 UGO	地上開度 OGO	地中地震計深さと 同距離範囲の尾根谷度 RVD_{dep}	J-SHIS 深部地下構造の 最大傾斜角 $Slope_{JS,max}$	J-SHIS 深部地盤構造の 最表層の傾斜角 $Slope_{JS,surf}$
J-SHIS 深部地下構造の 地中地震計深度層の傾斜角 $Slope_{JS,hole}$	EHVSR のピーク周波数 (ターゲット周波数) $f_{p,HV}$	ターゲット周波数と 卓越周波数の乖離 $f_{p,HV}/f_{0,S}$	偶然的ばらつきの 平均値からの乖離 ϕ_p/ϕ_{mod}	

6.3.5 サイトパラメータの感度解析結果

に感度解析の結果を示す。系統的ばらつきに対して特に寄与度の高い（SHAP 値の絶対値平均が大きい）パラメータとして、以下の 3 つが抽出された。

1. $f_{p,HV}$ （EHVR のピーク周波数）

サイトの共振特性を直接的に表す指標であり，系統的ばらつきの大きさと最も強い相関を示した。

2. V_{Shole} （地中地震計設置位置の S 波速度）

地中地震計の設置基盤の剛性を表す指標。設置基盤の S 波速度が大きいほど，系統的ばらつきが大きく，卓越周波数の高周波数化，もしくは硬い地盤ほど複雑な地形を有するなどの，複合的要因に起因していることが考えられる。

3. $S.D._{RVD}$ （尾根谷度の方位標準偏差）

サイト周辺（半径 250m）の地形の凹凸の激しさや方向性を表す指標。この値が大きい（周辺地形が複雑である）ほど，系統的ばらつきが増大することが確認された。

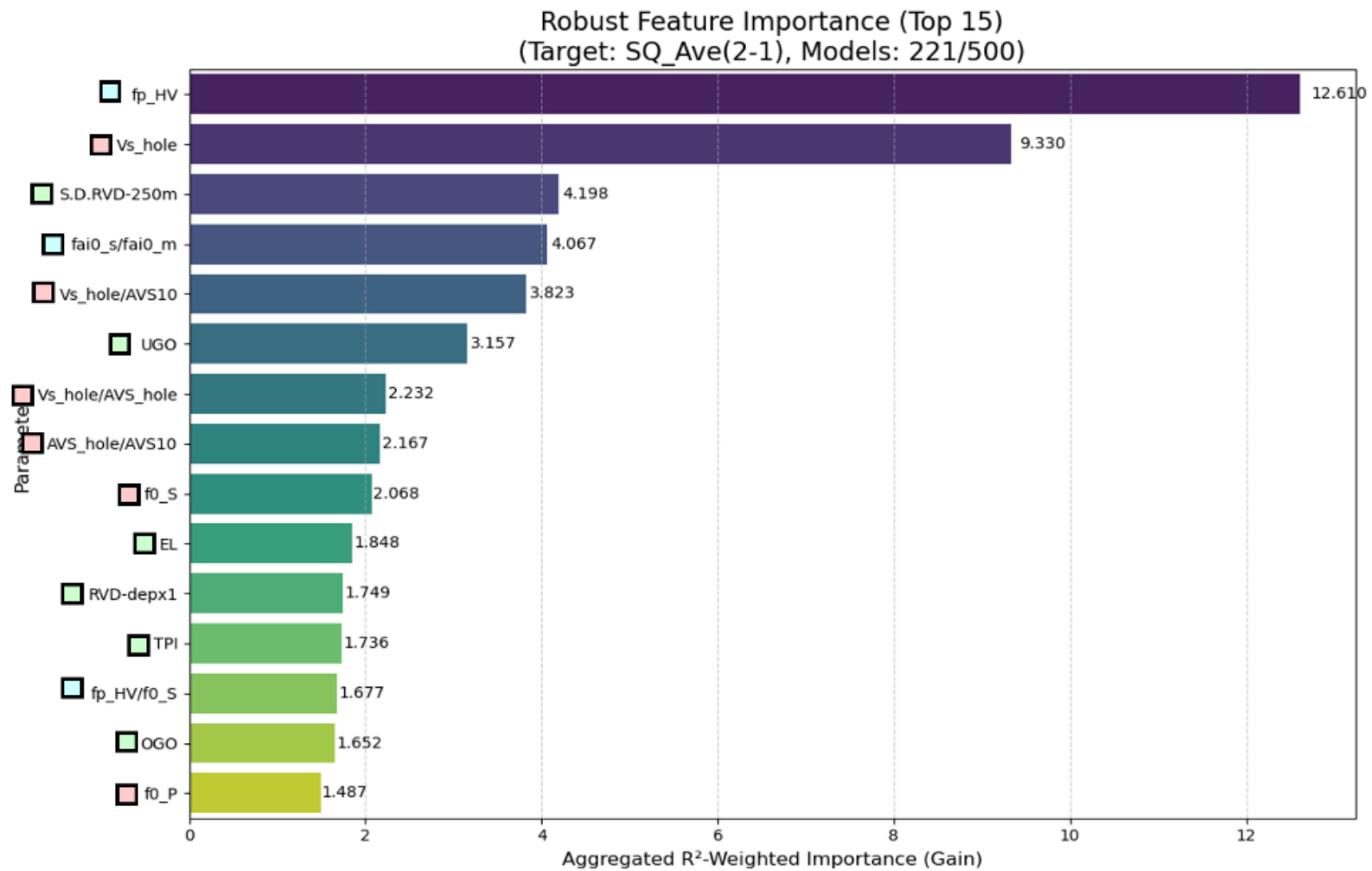


図 6-6 LightGBMによる感度解析結果

6.4 サイトパラメータに基づく簡易評価手法の提案

6.4.1 パーセンタイルに基づく類型化手法

前節の感度解析において、LightGBM を用いた回帰モデルの構築を試みたが、検証データに対する決定係数は最大でも 0.35 程度にとどまった。これは、系統的ばらつきという現象が、本研究で考慮したサイトパラメータ以外の未知の要因（例えば、より深部の地下構造や、震源の微細な破壊過程との結合など）にも影響を受けていること、あるいはパラメータ間の関係が極めて複雑であることを示唆している。したがって、任意の地点における系統的ばらつきの絶対値を、回帰式を用いてピンポイントで予測することは現状では困難であると判断した。

しかしながら、SHAP 値による分析から、系統的ばらつきを支配する主要な要因が $f_{p,HV}$, V_{Shole} , $S.D._{RVD}$ の 3 点にあることは明確となった。そこで本節では、予測の精度ではなく「尤度（確からしさ）」の評価に視点を移し、これらの重要パラメータを用いて観測点を単純に類型化（カテゴライズ）することで、サイトが潜在的に有する不確実性のレベルを工学的に評価する手法を検討する。

複雑なクラスタリング手法は用いず、実務的な適用性を考慮したシンプルかつロバストな分類手法を採用した。具体的には、特定された 3 つの重要パラメータ ($f_{p,HV}$, V_{Shole} , $S.D._{RVD}$) のそれぞれについて、全観測点のデータ分布における 33 パーセンタイル値および 67 パーセンタイル値を閾値として設定した。これにより、各パラメータを「小 (Low)」・「中 (Mid)」・「大 (High)」の 3 つの水準に区分し、その組み合わせによって観測点の特性を類型化した。

6.4.2 類型化されたサイト特性と系統的ばらつきの関係

図 6-7 に、各クラスの系統的ばらつきの結果を示す。また、各パラメータの閾値を表 6-2 に、各クラスにおける統計的ばらつきの中央値および四分位範囲を表 6-3 に示す。設定した各パラメータのクラスごとに、属する観測点の系統的ばらつきの中央値を算出し、その傾向を分析した。その結果、物理的な地盤背景と整合する以下のような明瞭な傾向が確認された。

地形の複雑さによる影響

$S.D_{RVD}$ のクラスが Low から High になるにつれて、系統的ばらつきの値は明瞭に増加する傾向を示した。これは、地表の地形が複雑になるほど、散乱や回折といった 2D/3D 的な波動伝播が顕著になり、方位依存性が増大するという解釈と一致する。

設置基盤の剛性による影響

V_{shole} のクラスが Low から High になるにつれて、系統的ばらつきが大きくなる傾向が見られた。ただし、 $S.D_{RVD}$ が Low のグループ、すなわち平坦な地形を有する観測点においては、 $f_{p,HV}$ のグループによってその傾向がより顕著に出る。 $f_{p,HV}$ が Low のグループでは、 V_{shole} による差は小さいが、High のグループでは、 V_{shole} がより支配的に変動している。

複合的な最大変動条件

以上の傾向を総合すると、系統的ばらつきは以下の 2 パターンの時に最大となることが示された。

- ・ 地形が平坦 ($S.D_{RVD}$ が Low) で共振周波数が高い (V_{shole} および $f_{p,HV}$ が High)
- ・ 地形が複雑 ($S.D_{RVD}$ が High) で共振周波数が高い (V_{shole} および $f_{p,HV}$ が High)

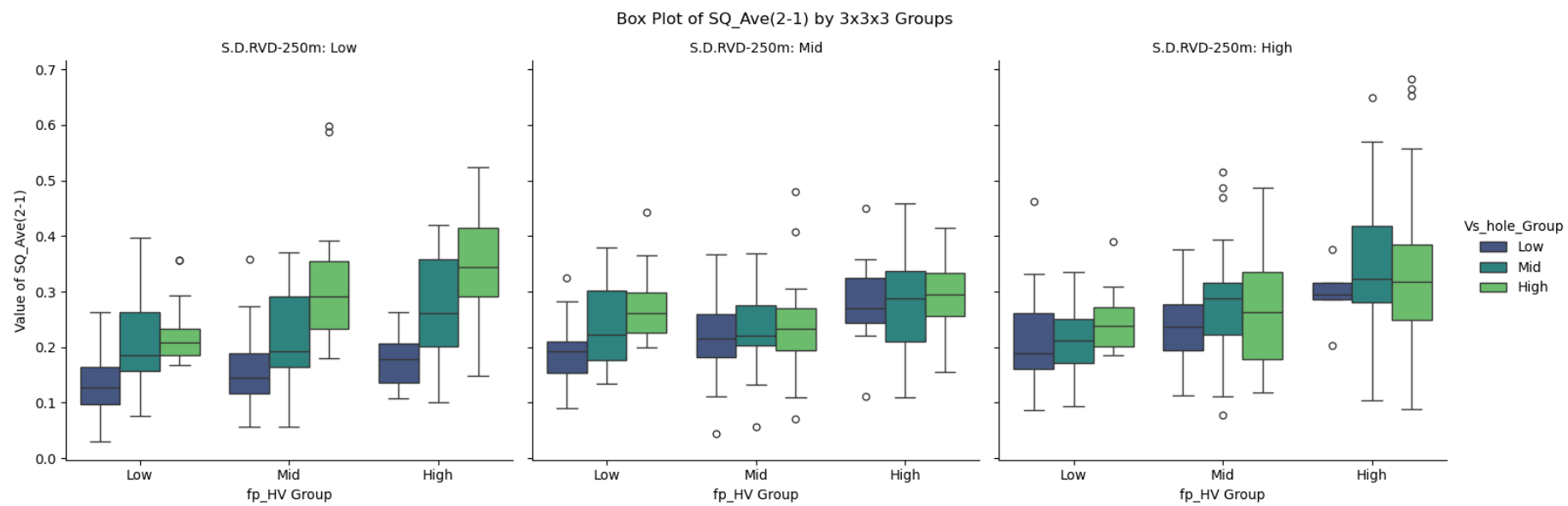


図 6-7 類型化による系統的ばらつきの評価

表 6-2 類型化に用いた各サイトパラメータの閾値

サイトパラメータ	パーセンタイル値	
	33%	67%
$f_{p,HV}$ (Hz)	3.4	5.25
V_{shole} (m/s)	1250	1990
$S.D.RVD$ (deg.)	2.55	4.63

表 6-3 クラスごとの系統的ばらつきの中央値と四分位範囲

				S.D.RVD-250m					
				Low		Mid		High	
				Median	IQR	Median	IQR	Median	IQR
fp_HV	High	Vs_hole	Low	0.132	0.065	0.192	0.055	0.190	0.099
			Mid	0.189	0.107	0.223	0.124	0.215	0.078
			High	0.210	0.050	0.263	0.073	0.238	0.069
	Mid		Low	0.149	0.071	0.217	0.078	0.238	0.082
			Mid	0.193	0.126	0.221	0.073	0.287	0.094
			High	0.292	0.120	0.234	0.073	0.260	0.155
	Low		Low	0.179	0.069	0.270	0.082	0.293	0.029
			Mid	0.263	0.155	0.288	0.124	0.321	0.134
			High	0.346	0.122	0.295	0.077	0.318	0.136

本検討の結果、機械学習のようなブラックボックス的なモデルを用いずとも、支配的な3つの物理パラメータを単純に3水準でランク分けするだけで、そのサイトにおける系統的ばらつきの大小関係を概略的に評価（スクリーニング）できることが明らかとなった。この手法は、「地形が複雑もしくは共振周波数が高い（硬い）場所では、1次元解析の不確実性が大きくなる」という定性的な知見、KiK-netの大規模データに基づいて定量的に裏付けるものであり、耐震設計実務において詳細調査や余裕幅の設定を検討する際の有用な判断材料となり得る。

6.5 まとめ

本章では、第 5 章において分離された地表/地中スペクトル比 (SBSR) の「偶然的ばらつき」および「系統的ばらつき」について、それぞれの物理的背景に基づいた特性分析を行い、最終的に実務に適用可能な簡易評価手法を提案した。本章で得られた知見と成果は以下の通りである。

偶然的ばらつきのモデル化

偶然的ばらつきは、サイトごとに異なる共振特性に依存するが、地盤構造 (PS 検層) から算出される一次卓越周波数で正規化することで、サイト条件によらず普遍的なスペクトル形状に収束することを見出した。これにより、基本的な地盤情報さえあれば、その地点で想定されるランダムな変動成分 (偶然的不確実性) の上限値を予測することが可能となった。

系統的ばらつきの支配要因の特定

系統的ばらつきは、単一の地形指標では説明できない複雑な現象であるが、機械学習 (LightGBM) と SHAP 値を用いた感度解析により、その変動を支配する主要因が「H/V ピーク周波数 ($f_{p,HV}$)」「基盤 S 波速度 ($V_{s_{hole}}$)」「尾根谷度の標準偏差 ($S.D._{RVD}$)」の 3 点にあることを突き止めた。これは、系統的ばらつきが「地形の不整形さ」と「地盤の増幅能 (インピーダンス比)」の相互作用として発現していることを定量的に裏付けるものである。

簡易評価手法の構築

特定された 3 つの支配パラメータを「小・中・大」の 3 水準に類型化し、系統的ばらつきの傾向を分析した結果、共振周波数が高い (もしくは硬質) サイトにおいて系統的ばらつきが最大化するという重要な知見を得た。これは、地形が平坦もしくは複雑である時に最大となり、硬質地盤においては短周期成分の散乱や入射角特性が応答に鋭敏に影響するためと考えられる。

本研究の一連の検討により、従来は一律に処理されがちであったサイト増幅特性の不確実性に対し、物理的根拠に基づく分離評価の枠組みを構築した。特に、軟弱地盤だけでなく、これまで比較的安定していると考えられてきた硬質地盤 (岩盤サイト等) においてこそ、方位依存性に起因する認識論的不確実性を慎重に見積もる必要があることを示した点は、耐震設計実務におけるサイト評価の精緻化が必要不可欠であることを強調するものである。

第 6 章の参考文献

- [6-1]Zhu, C., Cotton, F., Kwak, D. Y., Ji, K., Kawase, H., & Pilz, M. (2022). Within-site variability in earthquake site response. *Geophysical Journal International*, 229(2), 1268-1281. doi:10.1093/gji/ggab481.
- [6-2]National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, KiK-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, doi:10.17598/NIED.0004.
- [6-3]Tao, Y., & Rathje, E. (2020). Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105865. doi:10.1016/j.soildyn.2019.105865.
- [6-4]García-Jerez, A., Luzón, F., Sánchez-Sesma, F. J., Lunedei, E., Albarello, D., Santoyo, M. A., & Almendros, J. (2013). Diffuse elastic wavefield within a simple crustal model. Some consequences for low and high frequencies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10), 5577-5595. doi: 10.1002/2013JB010107.
- [6-5]Marcellini, A. (2006). Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. *Interpretation A Journal Of Bible And Theology*, 1-69.
- [6-6]Barani, S., De Ferrari, R., & Ferretti, G. (2013). Influence of soil modeling uncertainties on site response. *Earthquake Spectra*, 29(3), 705-732. doi:10.1193/1.4000159.
- [6-7]National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), J-SHIS, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. doi:10.17598/nied.0010.
- [6-8]国土地理院, 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php> (参照 2024-12-08)
- [6-9]佐藤浩章, 栗山雅之(2025) 地形サイト特性を評価するための指標の抽出と K-NET 及び KiK-net への適用, *日本地震工学会論文集*, 25(4), 4_12-4_23. doi:10.5610/jaee.25.4_12.
- [6-10]Bahrapouri, M., & Rodriguez - Marek, A. (2023). One - dimensional site response analysis: Model error estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(1), 401-416. doi:10.1785/0120210291.
- [6-11]Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [6-12]Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765-4774.

第 7 章 結論

7.1 本研究の総括

本研究では、地震工学におけるサイト特性評価の高度化を目的として、全国の KiK-net で得られた膨大な強震観測記録に基づき、地表/地中スペクトル比 (SBSR) に見られる方位依存性と変動特性に関する体系的な研究を行った。従来の 1 次元重複反射理論やエルゴード的なハザード評価の枠組みでは偶然的ばらつきとして統計処理されてきた変動成分の中に、サイト固有の物理的要因に起因する系統的ばらつきが含まれていることを実証し、その分離・評価手法および簡易予測手法を提案した。

KiK-net 観測網を用いた網羅的な統計分析により、線形範囲内の挙動であっても SBSR は地震イベントごとに無視できないばらつきを有することを確認した。特に、Transverse 成分を用いた分析および特定観測点 (CHBH14) の詳細解析から、この変動は地震波の入射角よりも「到来方位」に対して強い依存性を持つことを多変量解析 (MANOVA) により統計的に実証した。これは、従来の 1 次元理論 (水平成層・鉛直入射仮定) の限界をデータに基づいて示したものである。

二重スペクトル比法 (TSR) を応用した解析により、SBSR の変動成分が近接観測点間 (20km 以内) であっても空間相関を持たないことを明らかにした。これにより、当該変動が震源や深部伝播経路といった広域的な要因 (大局的要因) ではなく、サイト直下の局所的な地盤特性に起因する現象であることを裏付けた。さらに、2 次元有限要素法 (FEM) を用いた数値シミュレーションにより、地下の不整形構造や急峻な地形における散乱・回折・干渉現象が、観測されたような方位依存性を物理的に再現し得ることを確認した。これらの検証により、SBSR の方位依存性に起因するばらつきは除去不可能なノイズではなく、適切なモデル化により説明可能な認識論的不確実性であることを定性的に示した。

観測された SBSR の地震間変動を、偶然的ばらつきと系統的ばらつきに分離する統計的枠組みを構築した。解析の結果、両者は同程度の寄与度を持っており、従来の手法では評価しきれなかったサイト内ばらつき (Single-Station Sigma) の約半分が、到来方位に依存する再現性のある系統的成分であることを明らかにした。

分離された各ばらつき成分に対し、実務適用を念頭に置いた簡易評価手法を構築した。偶然的ばらつきは、サイトの一次卓越周波数 (f_0) で正規化することで、サイト条件によらず普遍的なスペクトル形状に収束することを見出した。系統的ばらつきは、機械学習 (LightGBM) を用いた感度解析により、支配的な要因が「H/V ピーク周波数 ($f_{p,HV}$)」「地中地震計設置基盤 S 波速度 ($V_{s,hole}$)」「尾根谷度の方位標準偏差 ($S.D._{RVD}$)」の 3 点にあることを特定した。これらを用いた類型化により、詳細な地盤調査を実施せずとも、地形・地質情報からサイト特性の不確実性幅を推定する手法を提案した。

7.2 課題と今後の展望

本研究では、SBSR の方位依存性を系統的ばらつきとして分離・評価する枠組みを構築し、その支配要因を明らかにした。しかし、実務における高精度な予測や物理メカニズムの完全な解明に向けては、いくつかの課題が残されている。以下に、本研究の課題とそれを踏まえた今後の展望を述べる。

系統的ばらつきの定量的予測モデルの高度化

第 6 章の感度解析において、系統的ばらつきを支配するパラメータ（H/V ピーク周波数、基盤 S 波速度、尾根谷度標準偏差）を特定したが、機械学習（LightGBM）を用いた回帰モデルによる予測精度（決定係数）は低水準に留まった。これは、系統的ばらつきが本研究で考慮したパラメータ以外の未知の要因（より深部の 3 次元構造や複雑な地下構造の相互作用など）にも影響されていることを示唆している。任意の地点におけるばらつきの絶対値をピンポイントで予測するためには、より多角的な地盤情報の集約や、モデル構造のさらなる検討が必要である。

偶然的ばらつきに含まれる残差成分の解明

本研究で抽出された偶然的ばらつきは、従来の評価に比べて低減されたものの、依然として一定の大きさを有している。同位置地震ペアを用いた分析の限界として、この成分の中には、震源の発震機構（放射パターン）の差異や、強震動入力履歴に伴う地盤物性の経時変化など、未解明の系統的要因が残存している可能性がある。真に予測不可能なランダム成分を特定し、不確実性をさらに低減するためには、震源物理や地盤の非線形挙動を考慮した詳細な分析が求められる。

非エルゴード的地震ハザード評価への実装と展開

上記の課題はあるものの、提案した類型化手法を用いれば、サイトが潜在的に有する不確実性のレベルを概略的に評価することは可能である。今後は、この手法を地震ハザード評価（PSHA）の枠組みに実装し、サイト固有の系統的ばらつきを適切に考慮することで、過度な保守性を排除した合理的な耐震設計への貢献が期待される。

観測記録のない地点への適用拡大

本研究で構築した簡易評価手法は、公開されている地形・地質情報に基づいているため、観測記録が存在しない一般的な建設地点へも適用可能である。今後は、KiK-net 以外の観測網や異なる地質環境への適用を通じて評価モデルの汎用性を高め、広域的なハザード評価の精緻化に寄与することを目指す。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、防災科学技術研究所が運用する基盤強震観測網（KiK-net）の貴重な強震観測記録を使用させていただきました。また、データの解析および図化にあたっては、**Generic Mapping Tools (GMT)** をはじめとするオープンソースソフトウェアの恩恵を受けました。これら高品質なデータおよび有用なツールが公開・提供されていることがなければ、本研究の成果は得られませんでした。関係各位に深く感謝いたします。

本論文の作成にあたり、終始懇切丁寧なご指導と多大なるご鞭撻を賜りました、北海道大学工学研究科 高井伸雄教授に、心より感謝の意を表します。私の未熟な議論や説明に対しても、常に寛大なご理解を示していただき、解析における鋭い着眼点や新たな視座をご教示いただきました。先生の多角的なご助言は、本研究の方向性を決定づける上で不可欠な指針となりました。ここに多大なるご指導を賜りましたこと、深く感謝申し上げます。また、大学院時代にご指導いただいた笹谷努元教授には、観測記録と徹底的に向き合い、そこに含まれる情報を余すことなく読み解く姿勢をご教授いただきました。本論文の執筆においてもこの姿勢が原点となっております。深く感謝申し上げます。

ご多忙の中、本論文の副査をお引き受けくださった菊池優教授、岡崎太一郎教授には、審査を通じて多くの貴重なご指摘ならびにご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。さらに、本論文の審査にご尽力いただきました審査委員の先生方にも、専門的見地から数多くの有益なご示唆を賜りましたことを、ここに記して感謝申し上げます。

本研究は、大成建設における業務と並行して実施いたしました。社会人学生としての研究活動に深い理解を示し、快く送り出してくださった内山泰生博士をはじめ、業務量の調整やサポートをしてくださった地震動チームの山本優博士、また方針について多くのご助言を頂きました徳光亮一博士、業務量調整の齎寄せにご協力いただいた五十嵐さやか博士、西本昌氏、連惇氏に厚く御礼申し上げます。皆様の温かい励ましと協力があったからこそ、研究と業務を両立し、本論文を完成させることができました。

最後に、博士課程在学中、家庭において常に楽しみを与え、精神的な支えとなってくれた妻 莉歩に、心からの感謝を捧げます。この期間は人生のイベントも多くあり、共に学生として過ごせた時間はとても新鮮でした。長期間にわたる不規則な生活を一番近くで支え続けてくれたことに、深く感謝します。