



HOKKAIDO UNIVERSITY

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_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 青木 雅嗣

学 位 論 文 題 名

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)

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 鉋子中観測点) 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 次元の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。