



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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 青木 雅嗣

審査担当者 主 査 教 授 高井 伸雄
副 査 特任教授 菊地 優
副 査 教 授 岡崎 太一郎

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)

将来起こりうる大地震に対して、ある地点・地域の強震動を適切に評価し、設計用入力地震動を作成することは、建築設計活動や都市防災政策の立案等にとって重要である。高精度な強震動予測には、震源特性、地震波の伝播特性、ならびに建設地点直下およびその近傍の地下構造が地震動に与える増幅効果を適切に評価する必要がある。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が、これは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。本論文では、観測される地震動の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している。

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 章では、本研究の背景と目的について述べ、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ている。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ている。

第 2 章では、本研究で使用する基盤強震観測網 (KiK-net) の観測記録の選定基準および解析手法について述べている。その上で、不整形地盤を有する特定の観測点を代表事例として取り上げ、到来方向別の観測地表/地中スペクトル比 (SBSR) に見られる大きな変動を示すことで、1 次元的评价の限界を実証的に示している。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 のピーク周波数および振幅が地震波の到来方位によって有意に変動すること、ならびに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ている。

第 3 章では、二重スペクトル比法に基づき、SBSR の変動に含まれる震源特性および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ている。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ている。

第 4 章では、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ている。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、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によって定性的に再現可能であることを実証している。

第5章では、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ている。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、従来の手法では評価しきれなかった系統的変動成分の定量的評価を行っている。

第6章では、第5章で評価した偶然的ばらつきおよび系統的ばらつきに対する簡易予測手法を提示している。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存しない共通した形状を示すことから、卓越周波数に基づく予測式を構築している。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ている。さらに、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グルーピングし、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ている。

第7章では、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と比較して、サイト増幅特性の予測精度が向上することを確認している。あわせて研究全体を総括し、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述べている。

これを要するに、本論文は、観測される地震動の変動特性を系統的ばらつきと偶然的ばらつきに分離・評価し、地震動の地盤による増幅特性に内在する方位依存性を考慮した実務に資する簡易評価手法を提案することで、従来手法の限界を克服する新たなアプローチについて論じたものである。これらの知見は、強震動予測手法の高度化に寄与し、地震工学・都市防災学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。