

京都大学	博士（工学）	氏名	新本 翔太
論文題目	Seismic Spectral Ratio Analysis Considering Rupture Directivity Effect and Source Heterogeneity (破壊指向性効果と震源の不均質性を考慮した地震スペクトル比解析)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、震源が近い二つの地震動観測記録のフーリエスペクトル比が震源特性の比となることを利用した震源特性の抽出解析である地震スペクトル比解析において、震源の形状、破壊伝播速度および破壊の伝播方向を推定する方法を提案し、それらに関する従来の仮定をはじめに緩和している。次に、余震を踏まえた地震被害想定のために、中小地震の震源解析法における新しい枠組みを提案し、その適用から得られた地震学的知見を整理している。本論文は6章で構成されており、以下に章ごとの内容と得られた成果を記す。</p> <p>第1章は序論であり、既往の研究を概観して当該研究領域の課題を整理した後に、本論文の目的と構成を示している。余震を考慮した地震被害想定のためには、小地震から大地震までの震源物理特性の知見を蓄積することが重要であり、中小地震の解析においても観測地震動のスペクトル比から震源特性を抽出することが必要であると述べている。従来、震源スペクトルのコーナー周波数を推定し、それから地震動の強さを特徴づける震源パラメータの一つである静的応力降下量を求めてきた。その際、震源の形状、破壊伝播速度および破壊伝播の方向性を仮定するが、求めた静的応力降下量が仮定によって大きく異なる問題点を指摘している。本章では、この仮定を緩和する手法の必要性を述べている。</p> <p>第2章では、すべり量が均質な長方形の震源形状を有する運動学的震源モデルを作成し、震源スペクトルモデルの新たな数学的表現を導出している。このモデルは震源特性を表現する複数のパラメータを有し、震源スペクトルを長方形震源の面積、形状、破壊伝播速度および破壊の伝播方向と関係づけている。この長方形震源モデルから求めた震源スペクトルには、スペクトル比を解析で得る際に、その値が発散して不安定な挙動を示すという課題が当初残されていた。この課題を解決するために、導出した震源スペクトルモデルを包絡線で近似する数学的表現を提案し、それを包絡スペクトルと呼んでいる。</p> <p>第3章では、第2章で提案した包絡スペクトルを用いるスペクトル比解析法を、日本の浅発地殻内地震（モーメントマグニチュード <math>M_w</math> で 3.2–6.0）に適用している。提案手法では、地震動を計測した各点でP波とS波ごとに得られた観測スペクトル比に、包絡スペクトルによるモデルスペクトル比を適合させ、長方形震源のパラメータを推定することができる。従来の方法では、全ての計測点の観測スペクトル比を平均したスペクトル比からコーナー周波数を推定していた。</p> <p>提案手法は多くのパラメータを有し複雑であるため、得られたモデルのスペクトル比が観測スペクトル比に高い精度で適合できているか否かを、適用例によって慎重に調べている。その結果、推定した断層破壊面積と防災科学技術研究所の広域地震観測網が提供している地震モーメントの値から計算した静的応力降下量が、ほとんどの地震で</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	新本 翔太
<p>10–200 MPa の範囲にあり、既往の研究で示されている大地震時の典型的な値の範囲 1–10 MPa よりも約一桁大きいことを示した。また、スペクトル比の適合が良好であるにもかかわらず、静的応力降下量が高くなっている現象を解明するために、提案手法で推定した破壊面積を大地震の有限震源インバージョン結果による破壊面積と比較している。その結果、提案手法で推定する断層面積が、すべりが大きい局所領域のうち最大面積の領域（最大アスペリティ領域）に対応することを明らかにしている。同時に、提案手法で推定した破壊面積と地震モーメントの関係は、既往の研究による最大アスペリティ領域と地震モーメントの回帰分析結果によく整合していることも明らかにしている。そこで、最大アスペリティ領域は平均的に破壊面全体の面積の 17.5% を占めるとする既往の研究結果を利用し、提案するスペクトル比解析によって推定した破壊面積から破壊面全体の面積を求めて静的応力降下量を計算する方法に、当初の提案を改善している。</p> <p>第 4 章では、静的応力降下量と地震モーメント、震源深さおよび破壊伝播速度などの関係を調べ、応力降下量と破壊伝播速度が逆相関することを明らかにしている。第 3 章と第 4 章は、震源スペクトルの形を規定するすべり量を表現する際に、局所的に大きい領域とすべり量が比較的小さい残りの領域で構成されるという比較的単純な不均質な震源モデルが有効であることを示唆している。</p> <p>そこで第 5 章では、実用性を考慮して、比較的単純な不均質震源モデルである単一アスペリティモデルを導入し、エネルギー収支の議論に適した応力降下量を求める方法を提案している。このモデルと最大アスペリティ面積が破壊面全体に対して 17.5% という仮定を用いて、単一アスペリティモデルのすべり分布で重みづけした応力降下量を、地震モーメントと提案するスペクトル比から推定した破壊面積から計算することを提案している。</p> <p>さらに、地震波の放射エネルギーを推定し、放射エネルギーから計算できる見かけ上の応力という物理量を提案している。通常、地震時のすべり分布は有限震源インバージョンを通じて取得するが、そのような詳細な解析は小地震では難しい。第 5 章は、比較的単純なスペクトル比法からエネルギー収支の議論に適した応力降下量が計算できる長所も提案手法に与えている。静的応力降下量は断層面に分布する応力降下量を平均したものであり、地震モーメントと震源面積から計算した静的応力降下量が、地震のエネルギー収支を議論するには不適切であることは、既往の研究から知られていた。解析の結果、静的応力降下量は Mw 5.1 付近までマグニチュードとともに増加し、Mw が約 5.1 以上ではマグニチュードに依存しなくなるという傾向を明らかにしている。見かけ上の応力を応力降下量で除した値の 2 倍である放射効率は、マグニチュードにあまり依存せず、およそ 0.1–1.0 の範囲であった。以上により、大地震と中小地震で応力降下量と見かけの応力は異なるが、放射効率が似ているという傾向を明らかにしている。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	新本 翔太
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、地震スペクトル比解析において、震源の形状、破壊伝播速度および破壊の伝播方向を推定する方法を提案し、それらに関する従来の仮定を緩和した上で、余震を踏まえた地震被害想定のために、中小地震の震源解析法における新しい枠組みを提案し、その適用で得られた地震学的知見を整理している。以下に、その内容と得られた成果を記す。

(1) すべり量が均質な長方形の震源形状を有する運動学的震源モデルを作成し、震源スペクトルモデルの新たな数学的表現を導いた。このモデルは、震源スペクトルを長方形震源の面積、アスペクト比、破壊伝播速度および破壊の伝播方向と関係づけているため、強い破壊指向性を示す中小地震にも適用できる。震源スペクトルモデルを包絡線で近似し、数値解析の安定性も確保している。地震動の各観測点でモデルのスペクトル比を適合させるため、全観測点で平均化した従来の解析よりも詳細な分析が可能となった。

(2) 提案した解析法を日本の浅発地殻内地震に適用し、推定した断層面積が局所的に大きなすべりが生じている断層の領域に対応することを明らかにした。次に、大きなすべりが生じる領域が平均的に破壊面全体の面積の 17.5%という既往の研究成果を利用して、推定した破壊面積から静的応力降下量を計算する方法を提案した。また、この応力降下量が破壊伝播速度と逆相関することも明らかにした。

(3) 地震のエネルギー収支を正確に評価するために、不均質なすべり分布で重み付けした応力降下量の有効性を示した。また、震源スペクトルの形状を規定するすべり量の評価のために、局所的にすべりが大きい領域と比較的小さい残りの領域で構成される比較的単純な不均質な震源モデルを工学的視点から提案した。この比較的単純なモデルの導入により、エネルギー収支の議論に適した応力降下量の計算が可能となった。

(4) 地震波の放射エネルギーを推定する目的で、放射エネルギーから計算する見かけ上の応力という物理量を提案し、静的応力降下量がモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) 5.1 付近まで  $M_w$  とともに増加し、5.1 以上では  $M_w$  に依存しない傾向を明らかにした。また、大地震と中小地震で応力降下量は異なるが、放射効率は類似する傾向を明らかにした。

本論文は、地震スペクトル比解析において、震源の形状、破壊伝播速度および破壊の伝播方向を推定する方法を提案し、中小地震の震源解析法における新しい枠組みを提案している。余震を踏まえた地震被害想定のために、破壊指向性効果と震源の不均質性を考慮した地震スペクトル比解析を提案・実証しており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年12月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。