

氏名・(本籍)	さいとう たつ ひこ 齊 藤 竜 彦
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2009号
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	前方散乱近似による高周波数地震波エンベロープ形成のモデル化
論文審査委員	(主査) 教授 佐藤 春夫 教授 大竹 政和, 浜口 博之, 教授 長谷川 昭, 藤本 博巳

## 論 文 目 次

### 第1章 序論

- 1.1 高周波数地震波動伝播に関する従来の研究
- 1.2 地震波エンベロープ形成に関する従来の研究
- 1.3 本研究の目的

### 第2章 ランダムな速度不均質構造をもつ媒質における波形エンベロープの導出理論

- 2.1 波動方程式の前方散乱近似
- 2.2 ランダム媒質のアンサンブルとマルコフ近似
- 2.3 べき乗型スペクトル構造をもつランダム媒質におけるエンベロープ
  - 2.3.1 von Kármán型のスペクトル構造
  - 2.3.2 理論エンベロープの導出
- 2.4 理論エンベロープの性質
  - 2.4.1 主要動継続時間の増大と最大振幅の減少
  - 2.4.2 減衰係数の導入

#### 2.5 議論

#### 2.6 結論

### 第3章 数値シミュレーションによる理論エンベロープの評価

- 3.1 波動場の数値シミュレーションによる基準エンベロープ
- 3.2 マルコフ近似法による理論エンベロープ
- 3.3 理論エンベロープと基準エンベロープとの比較
- 3.4 議論
- 3.5 結論

### 第4章 東北地方の火山フロントを境にしたS波エンベロープの相違

- 4.1 はじめに
- 4.2 S波エンベロープの主要動継続時間の特徴

- 4.2.1 データ
- 4.2.2 主要動継続時間の計測
- 4.2.3 主要動継続時間の周波数依存性の特徴
- 4.3 主要動継続時間の解析による速度不均質構造のスペクトル推定
  - 4.3.1 理論エンベロープに基づくスペクトル推定法
  - 4.3.2 火山フロントを境にした速度不均質構造のスペクトル形状の相違
- 4.4 議論
- 4.5 結論
- 第5章 S波エンベロープの主要動継続時間と最大振幅の統一的解釈
  - 5.1 東北地方の火山フロント前弧側で観測されるS波主要動の特徴
    - 5.1.1 データ
    - 5.1.2 主要動継続時間の震源距離依存性
    - 5.1.3 最大振幅の震源距離依存性
  - 5.2 理論エンベロープから予測される主要動継続時間と最大振幅
  - 5.3 主要動継続時間と最大振幅の解析による地下構造推定
  - 5.4 議論
  - 5.5 結論
- 第6章 マルコフ近似法と輻射伝達理論の融合による全エンベロープ合成の試み
  - 6.1 輻射伝達理論によるコーダエンベロープのモデル化
    - 6.1.1 多重等方散乱モデルの定式化
    - 6.1.2 基準エンベロープとの比較
  - 6.2 マルコフ近似法と輻射伝達理論の融合による全エンベロープ合成法の提案
    - 6.2.1 マルコフ近似法と輻射伝達理論の理論エンベロープ
    - 6.2.2 全エンベロープ合成法
  - 6.3 議論
  - 6.4 結論
- 第7章 結論
- 参考文献
- 付録A マルコフ近似の詳細
- 付録B 準単周波数近似による2周波数相互相関関数の微分方程式の変形
- 付録C ガウス型スペクトル構造をもつランダム媒質におけるエンベロープ
- 表
- 図

## 論文内容要旨

高密度かつ高性能な地震観測網の展開によって、地下の不均質構造と震源での破壊過程に関して微細なスケールでの推定が行われるようになり、高周波数域における地震波動伝播を高い精度でモデル化する必要性が高まってきている。しかしながら、1~2Hzよりも高い周波数領域における地震波形は複雑な様相を呈し、既存の理論モデルだけでは直達S波を含む主要動部付近のふるまいを十分に記述することが

できない。インパルス的に輻射された波が不均質構造を伝播するとき、波の位相は不均質構造に大きく乱されるが、そのエンベロープ形状は比較的安定しており、不均質構造のスペクトルに強く支配されることが知られている。本研究では、この点に着目し、波動場の統計的取り扱いに基づくエンベロープ導出の理論構築を行うとともに、観測される小地震のS波エンベロープの主要動部の解析から地下不均質構造のスペクトル形状の推定を行った。

第1章では、高周波数域における地震波動の伝播過程を記述するさまざまなアプローチとその特徴をまとめた。中でも、マルコフ近似法と呼ばれる波動論に基づく統計的な理論エンベロープモデルは、地震波のエンベロープ解析に比較的有効であることが知られている。従来用いられてきたマルコフ近似法が抱える問題点を簡潔に記すとともに、本研究の目的と構成を示した。

地震学分野で従来用いられてきたマルコフ近似法は平面波伝播の仮定のもとで定式化されたもので、幾何減衰の効果を正確に評価することができない。第2章では、球面波伝播の仮定のもとでマルコフ近似法を定式化し、幾何減衰の効果を正確に取り入れた理論エンベロープの合成を行った。また、べき乗型のスペクトル構造をもつvon Kármán型ランダム媒質を導入することで、周波数依存性をもつ理論エンベロープを導出することに成功した。この理論エンベロープの周波数依存性は、スペクトル構造の短波長域でのべきの大きさに支配される。

第3章では、数値計算に基づいて第2章で定式化した理論エンベロープの評価を行った。2次元のvon Kármán型ランダム媒質 ( $\epsilon = 5\%$ ,  $\alpha = 5\text{km}$ ,  $\kappa = 1.0, 0.5, 0.1$ ) において、卓越周波数2Hzのリッカー波の波動伝播を差分法で計算した。この数値計算で作成したエンベロープを基準として理論エンベロープを評価した結果、マルコフ近似法はエンベロープ主要動部の理論的導出方法として有効であることが確認できた。

第4章では、第2章で定式化した理論エンベロープに基づき、東北地方で観測される地震波の解析を行った。東北地方で観測される小規模のやや深発地震のS波エンベロープ (2 - 16Hz) は、火山フロントを境に、その東西で主要動継続時間の周波数依存性が異なる。前弧側で観測される主要動継続時間の周波数依存性は弱い。一方、背弧側で観測した場合には、周波数の増大に伴い主要動継続時間が増大する傾向がある。観測された主要動継続時間の周波数依存性・震源距離依存性を解析し、S波の速度不均質構造のスペクトル形状の推定を行った。S波の平均速度を  $V_0 = 4.2\text{km/s}$ 、内部減衰および広角度散乱による減衰構造を  $b = 0.03\text{s}^{-1}$  ( $Q^{-1} = 0.0048f^{-1}$  ただし周波数  $f$  の単位はHz) と仮定したとき、短波長域における速度不均質構造のパワースペクトル密度関数は、前弧側で  $P(m) \sim (0.004 \sim 0.017) \times m^{5.0 \sim 4.4} \text{km}^3$ 、背弧側では  $P(m) \sim (0.018 \sim 0.024) \times m^{4.9} \text{km}^3$  と推定された (ただし、波数  $m$  の単位は  $\text{km}^{-1}$ )。火山フロントの背弧側で観測される周波数の増大に伴う主要動継続時間の拡大現象は、S波の速度不均質構造の短波長スペクトル成分が多いためと解釈できる。

第5章では、解析対象領域を東北地方の火山フロントの前弧側に絞り、観測されるS波エンベロープについて、主要動継続時間だけでなく最大振幅を含めた主要動部の特徴を抽出した。震源距離がおおよそ80kmから400kmの範囲で、主要動継続時間は震源距離のおおよそ1.7乗から1.8乗で増加し、最大振幅は震源距離のおおよそ-2乗から-4乗で減少する。観測された主要動継続時間と最大振幅の震源距離依存性から、 $\kappa = 0.8$  とした場合、速度不均質構造のスペクトル形状を規定するパラメータは  $\epsilon^{2.01} / \alpha \sim 10^{-3.11} \text{km}^{-1}$ 、内部減衰および広角度散乱による減衰は周波数帯域 2Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz においてそれぞれ  $b = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04\text{s}^{-1}$  と推定された。観測されたS波エンベロープの主要動継続時間および最大振幅の特徴は、第2章で定式化した理論エンベロープで統一的に説明できることが示された。

第6章では、直達波からコーダ波までを含む全エンベロープを合成する新たな理論エンベロープモデルの開発を目的とした理論的研究を行った。第3章で作成した2次元von Kármán型ランダム媒質における基準

エンベロープを用いて、理論モデルの有効性を検証した。まず、輻射伝達理論による理論エンベロープによって、コーダエンベロープのモデル化を行った。粗い不均質構造 ( $\kappa = 0.1$ ) の場合には、その有効等方散乱係数は、Born近似による散乱係数から計算された輸送散乱係数を用いて、理論的に求めることができる。一方、Born近似が破綻する場合 ( $\kappa = 1.0, 0.5$ ) には、有効等方散乱係数を波動場の数値シミュレーションから経験的に導出することが必要となる。さらに、前方散乱の寄与が重要となる主要動部にはマルコフ近似法を、広角度散乱の寄与が重要となるコーダ部には輻射伝達理論を用い、両者を融合したモデル化による全エンベロープ合成法を新たに提案した。これによる理論エンベロープは、マルコフ近似法や輻射伝達理論を単独で用いた場合よりもはるかに忠実に全エンベロープ形状を再現できることが示された。

本研究は、べき乗型のスペクトル構造をもつランダム媒質において点震源から輻射された波のエンベロープを統計理論的に導出し、地震波エンベロープの解析から速度不均質構造のスペクトル形状を推定することを可能にした。速度不均質による多重前方散乱の効果は、主要動継続時間を増加させると同時に振幅減衰をもたらす。これによって地震波エンベロープのS波主要動の継続時間と最大振幅の伝播距離による変化を同時に定量的に説明することが初めて可能となった。また、2次元媒質ではあるが、マルコフ近似法と輻射伝達理論の融合による新たな理論エンベロープ合成法を提案することによって、従来よりも精度よくエンベロープを合成できることを示した。本研究の成果は、高周波数の地震波解析においてエンベロープに着目した統計的なアプローチが有効であることを示し、それに不可欠な地震波エンベロープ形成の理論に新たな進展をもたらした。地下不均質構造における地震波の散乱モデルをさらに発展させることによって、固体地球内部をより深く理解することが可能になるであろう。

## 論文審査の結果の要旨

地震波は震源から輻射される際にはパルス的であるが、地球の不均質構造の中を伝播するに従ってその形は崩れ、振幅が減少すると共に主要動の継続時間が長くなる。1 Hzよりも高い周波数では位相が大きく乱れるため、観測波形の解析から地下の不均質構造を決定論的に推定することは難しい。しかしそのような高い周波数域帯域であっても、地震波形のエンベロープ形状は比較的安定しており、その形状の周波数依存性は不均質構造のスペクトルを反映していると考えられる。本論文は、ランダム媒質における波動方程式を確率統計的に解いて波形エンベロープを導出し、観測される小地震のS波主要動のエンベロープの解析から地下の不均質構造のスペクトルを推定する方法を提案したものである。

本論文は、フォン・カルマン型ランダム媒質において点震源からパルス的に輻射された波のエンベロープを、波動方程式に前方散乱近似を適用した上で確率統計的に初めて導出した。このエンベロープ形成のモデル化によって、エンベロープの周波数依存性と不均質構造のスペクトルの関係が明らかになった。次に、東北地方で観測されるやや深発地震のS波エンベロープを解析し、火山フロントを境にして前弧側（東側）では主要動継続時間が周波数にほとんど依存しないが、背弧側（西側）では周波数の増大につれて主要動継続時間が長くなる傾向があることを明らかにした。これは、前弧側に比べて背弧側では速度不均質構造の短波長スペクトル成分が多いためと解釈できる。これらのスペクトルの違いは、島弧の地下不均質構造に関する新しい知見である。震源距離の増加に伴うS波最大振幅の減衰と主要動の継続時間の増加は、このモデルによって始めて統一的に説明することが可能となった。さらに、マルコフ近似法と輻射伝達理論の融合による新たな理論エンベロープ合成法を提案することによって、直達波近傍のみならずコーダ波に至るまでの全エンベロープを従来よりも精度よく合成できることを示した。本論文は、高周波数の地震波解析においてエンベロープに着目した統計的なアプローチが有効であることを示し、それに不可欠な地震波エンベロープ形成の理論に新たな進展をもたらした。

本論文は、齊藤竜彦が今後自立した研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、齊藤竜彦提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。