

氏名・（本籍）	お ばら かず しげ 小 原 一 成
学位の種類	博 士（理 学）
学位記番号	理 第 9 9 7 号
学位授与年月日	平 成 4 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和60年 3 月 東北大学大学院理学研究科 （前期 2 年の過程）地球物理学専攻修了
学位論文題目	関東東海地域における深発地震の S 波エンベロープの特徴と不均質構造の推定
論文審査委員	（主査） 教 授 長谷川 昭 教 授 平 澤 朋 郎 教 授 浜 口 博 之 教 授 大 竹 政 和 助 教 授 佐 藤 春 夫

## 論 文 目 次

謝辞

概要

### 1. 序論

#### 1-1. ランダムな不均質性と S 波エンベロープ

#### 1-2. 関東東海地域における不均質構造に関するこれまでの研究

### 2. 関東東海地域で観測された深発地震の S 波エンベロープの特徴

#### 2-1. はじめに

#### 2-2. データ及び解析方法

#### 2-2-1. 関東東海微小地震観測網と波形収録解析システム

#### 2-2-2. 解析に用いた地震

#### 2-2-3. 波形データ処理

- 2-3. S波エンベロープの主な特徴
    - 2-3-1. S波エンベロープの地域性と震源位置
    - 2-3-2. S波エンベロープの振幅
    - 2-3-3.  $t_p$ ,  $t_q$  の一般的特徴
  - 2-4. 震源距離依存性
  - 2-5. 周波数依存性
    - 2-5-1. 各観測点における  $t_p$ ,  $t_q$  の周波数依存性
    - 2-5-2. 個々の地震波線に対する  $t_p$ ,  $t_q$  の周波数依存性
    - 2-5-3. 火山フロントの両側における  $t_p$ ,  $t_q$  の周波数依存性
  - 2-6. 観測結果のまとめ
  - 3. モデルの検討と放物近似に基づくS波エンベロープの特徴
    - 3-1. モデルの検討
      - 3-1-1. 反射波, ガイド波, 散乱波
      - 3-1-2. 不均質構造による前方散乱波 (回折波)
    - 3-2. 放物近似に基づくエンベロープシミュレーション
    - 3-3. 放物近似に基づくS波エンベロープの特徴
      - 3-3-1. 各パラメタのエンベロープ形状に対する影響
      - 3-3-2.  $t_p$ ,  $t_q$  の特徴
  - 4. 放物近似に基づくランダム不均質性の推定
    - 4-1. 周波数依存性に基づく  $p$  (自己相関関数の型) の推定
      - 4-1-1. 観測結果とシミュレーション結果との比較
      - 4-1-2. 周波数依存性から推定された  $p$  と震源距離依存性との比較
      - 4-1-3. 放物近似の限界について
    - 4-2. ランダム不均質性のスペクトル構造
      - 4-2-1. 相関距離とゆらぎの強さの推定
      - 4-2-2. ランダム不均質性のスペクトル表現
      - 4-2-3. スペクトル構造の地域性
    - 4-3. 考察
  - 5. 議論
    - 5-1. 関東東海地域におけるランダム不均質性
    - 5-2. 放物近似の問題点と他のモデルの可能性
  - 6. 結論
- 参考文献

# 論文内容要旨

## 1. 序論

関東東海地域は、その直下に太平洋プレート及びフィリピン海プレートが沈み込むと共に中央部には火山フロントが存在し、テクトニクス的に複雑な構造をしている。最近の3次元地震波速度構造の解析からこの地域における地殻及び上部マントルが不均質であることがわかってきたが、空間的分解能が20~30 km程度であるためこれより短い波長の不均質性については解明されていない。火山フロント付近のマントルウェッジにおける短波長成分の不均質性を解明することは、沈み込み帯の火山活動を考える上で重要である。

一般に、不均質速度構造はその中を伝播する地震波に様々な影響を及ぼす。短周期地震計で観測されるS波主要動の継続時間は地震の規模から推定されるものより長い場合が多いが、この現象も地球内部の不均質構造を反映したものと考えられる。つまり、不均質性によって散乱や回折結果が生じ、震源付近ではパルス的であった波が伝播距離の増大と共に崩れ、継続時間が広がることが予想される。従って、S波主要動の継続時間に関する解析を行うことは、地震波が通過した領域における不均質性の強さの定量的な推定を可能にすると考えられる。

本研究では、沈み込む太平洋プレート内に発生した深発地震の地震波形成記録におけるS波主要動の継続時間に着目し、その特徴を明らかにすると共に、これらの波線が通過する沈み込み帯の地殻及び上部マントルの不均質速度構造について解析を行った。

## 2. 関東東海地域で観測された深発地震のS波エンベロープの特徴

沈み込む太平洋プレート内の深さ80 kmから500 kmに発生した58個の地震について、関東東海地域の73観測点で観測された水平動成分の地震波形成記録から、1, 2, 4, 8, 16 Hzを中心周波数とする周波数帯域毎にRMS(2乗平均の平方根)振幅を求めた。以下では、このS波初動着信以後のRMS振幅記録をS波エンベロープと呼ぶことにする。S波エンベロープの形状を解析するにあたっては、S波初動着信時からS波エンベロープの振幅が最大となるまでの経過時間( $t_p$ )と、S波エンベロープの振幅が最大値の半分に下がるまでのS波初動からの経過時間( $t_q$ )の読み取りを行った。

観測点毎に $t_p$ 及び $t_q$ の震源距離や周波数に対する特徴を調べた結果、これらは震源距離や周波数の増加と共に広がり、その震源距離依存性や周波数依存性は地域によって異なることを明らかにした。 $t_p$ と $t_q$ は、ばらつきは大きいものの似たようなふるまいを示し、S波エンベロープの最大振幅の到達が遅れることと継続時間幅が広がることはほぼ同等である。観測点が太平洋沿岸付近に位置する場合にはS波エンベロープの形状は震源距離にはほとんど依存しないが、観測点の位置が西に移るに従ってS波エンベロープの時間幅は震源距離の増加と共に拡大する傾向を示す。さらに、火山フロントより西側に位置する観測点では、震源距離と共にS波エンベロープの時間幅の広がる傾向は一層顕著になる。一方、1 Hzから8 HzのS波エンベロープから読み取っ

た  $t_p$ ,  $t_q$  と周波数との関係を調べると、火山フロントより東側ではS波エンベロープの時間幅は周波数に対してあまり変化しないが、火山フロント付近では周波数が高くなるに従って徐々に広がり、火山フロントより西側では周波数の増加と共に広がる傾向が顕著である。地震を発生した深さに分けて調べてみると、100km よりも浅い地震の場合ほどの観測点でもS波エンベロープの形状は周波数に対してほとんど変化しないが、震源が深くなるに従って火山フロントより西側に位置する観測点における周波数依存性が顕著になり、高周波側でS波エンベロープの時間幅が広がる。このとき、S波エンベロープの形状の広がり方は2 Hz と 4 Hz の間でステップ的に変化する場合があります、さらに高周波数側のS波エンベロープの時間幅は観測点の位置が火山フロント付近から西側に移るに従って徐々に大きくなる。S波エンベロープの時間幅が拡大し、最大振幅の到達が遅れるという現象は、震源と観測点が共に火山フロントの背弧側に位置する場合、特に地震波が火山フロントより西側のマントルウェッジを通過するときに、約 4 Hz 以上の高周波側で顕著であることがわかった。

### 3. モデルの検討と放物近似に基づくS波エンベロープの特徴

観測されたS波エンベロープの特徴を説明するモデルとして、プレートのようなスケールの大きい不均質構造に関連して生じる後続波の可能性について検討した。その結果、太平洋プレート下面や2重深発地震面下面からの反射波、フィリピン海プレートや火山フロントを伝播するガイド波などでは、観測されたS波エンベロープの周波数依存性を説明することはできないことがわかった。また、沈み込み帯をモデル化して1次散乱に基づくシミュレーションを行ったが、観測結果を説明することは困難であった。

次に、等方ランダム不均質速度構造の長波長成分のゆらぎによる多重前方散乱ならびに回折効果を考え、シミュレーションを行ってS波エンベロープの時間幅に関する特徴を調べた。地震波の波長よりも速度ゆらぎの相関距離が長い場合には放物近似を適用することができ、それに基づいて導かれたS波エンベロープ形状は、ランダム不均質構造の自己相関関数の型を表すパラメタ  $p$ 、特徴的時間及びS波の減衰係数によって決定される。ここで  $p = 2$  はガウス型、 $p = 1$  は指数関数型の自己相関関数を表す。特徴的時間は周波数や伝播距離のベキ乗に比例するが、それらのベキは  $p$  に支配される。 $p$  の値を変えてS波エンベロープのシミュレーションを行った結果、 $p = 2$  の場合にはS波エンベロープの形状は震源距離の増加に応じて広がるものの周波数に関しては変化せず、 $p = 1$  では震源距離や周波数の増加と共に広がることを示した。 $p$  が1から2の間にあるときは、S波エンベロープの形状の震源距離依存性や周波数依存性は中間的な値を示す。減衰の効果は経過時間が長くなるほどエンベロープの時間幅を狭めるため、エンベロープの形状の時間幅の拡大には限界があることが示された。以上のように、放物近似に基づくモデルを用いて、観測されたS波エンベロープの周波数依存性を説明できる可能性があることが明らかになった。

#### 4. 放物近似に基づくランダム不均質性の推定

観測から求められたS波エンベロープの周波数依存性と放物近似に基づくシミュレーション結果との比較から、観測点毎に自己相関関数を特徴づけるパラメタ  $p$  の推定を行った。その結果、火山フロントより東側の地域では自己相関関数がガウス型で表される ( $p = 2$ ) のに対して、火山フロント付近ではガウス型よりやや指数関数型に近づき ( $p = 1.6 \sim 1.8$ )、火山フロントより西側の地域では指数関数型に近い ( $p = 1.2 \sim 1.6$ ) ことが推定された。火山フロント付近から西側の観測点では、観測された  $p$  を用いてシミュレーションから期待されるS波エンベロープの伝播距離依存性と観測から求められた震源距離依存性が調和的であるのに対して、火山フロントの東側、特に太平洋沿岸付近の観測点では、シミュレーションから期待される伝播距離依存性よりも観測から求められた震源距離依存性の方が小さい。これは、地震波がエンベロープ拡大を引き起こさない均質媒質中をも伝播するためと考えられる。これらの観測点に至る地震波は太平洋プレート内を長く伝播するため、その内部がS波エンベロープの拡大を生じさせないような均質媒体であること示唆する。放物近似に基づく解析ではゆらぎの強さと相関距離をそれぞれ独立に求めることはできないため、観測された  $t_p$ ,  $t_q$  および推定された  $p$  をもとに、観測点毎に  $\varepsilon v^2/a$  の推定を行った。さらに、相関距離を10kmと仮定してランダム不均質性のパワースペクトル密度を求めた結果、速度ゆらぎのパワーの長波長成分には特に地域性は認められないが、短波長成分は火山フロントより西側の地域で強いことを明らかにした。以上の結果は、火山フロントの西側における不均質速度構造の短波長成分が、火山フロントの東側に較べて強いことを示している。

#### 5. 議論

ガウス型の自己相関関数を仮定して行われたNORSARやLASA等のアレイ解析の結果と比較すると、関東東海地域で求められた速度ゆらぎの方が大きい、これは沈み込み帯という複雑なテクトニクスを反映していると考えられる。一方、Sコーダ波励起とS波の減衰から調べられた関東地方のランダム不均質性と比較すると、本研究で求められた速度ゆらぎの方が小さいが、放物近似に基づく解析では後方散乱を無視しており、地震波の波長より短波長成分のゆらぎによる効果を考慮していないためと考えられる。火山フロントより西側で観測されたS波エンベロープの時間幅が高周波側で放物近似から予測された値より大きくなることは、前方散乱を主体とした放物近似を適用することにやや無理があることを示しており、広角散乱を考慮した多重散乱モデルなどを考える必要性を示唆する。

#### 6. 結論

本研究によって、火山フロントの前弧側と背弧側とで不均質速度構造の性質が異なることが明らかになった。火山フロントの背弧側のマントルウェッジで速度ゆらぎの短波長成分が強いという事実は、沈み込み帯の構造に関してこれまでに知られていた低速度、lowQであることに付加する新しい知見であり、沈み込み帯におけるダイナミクスを理解する上で大変重要である。今

後は、このような不均質構造が関東東海地域のみ是否存在するのか、沈み込み帯の一般的特徴であるかどうかを検証することが必要である。

## 論文審査の結果の要旨

地球内部の不均質構造は、その中を伝播する地震波に様々な影響を及ぼす。地表で観測される地震波記録には、このような影響が含まれており、それを正しく評価することができれば、逆に地球内部の不均質構造の推定が可能となる。小原一成提出の論文は、関東・東海地域において近地地震のS波主要動継続時間の震源距離依存性・周波数依存性を系統的に調査し、それにより明らかにされた特徴から、典型的な沈み込み帯であるこの地域の地殻・上部マントル不均質構造の推定を行ったものである。

関東・東海地域の73観測点で得られた58個の近地地震の波形記録を用い、それらのRMS振幅をとることによりS波エンベロープを求め、その形状からS波主要動部分の時間変化の特徴を抽出した。S波初動到達時刻からS波エンベロープが最大になるまでの経過時間 $t_p$ 、最大値の半分に下がるまでの経過時間 $t_q$ の震源距離依存性・周波数依存性を調べた結果、それらには明瞭な地域性があることを明らかにした。すなわち、地震波線が火山フロントより東側にある場合、 $t_p$ 、 $t_q$ は震源距離および周波数にあまり依存しないが、西側では震源距離および周波数とともに $t_p$ 、 $t_q$ が顕著になることを見出した。

さらに、上記の観測事実が、等方ランダム不均質速度構造の長波長成分のゆらぎによる多重前方散乱および回折効果で説明されることを示し、放物近似に基づくシミュレーションからS波エンベロープの形状を数値的に求め、観測事実と比較することにより、この地域のランダム不均質速度構造を推定した。すなわち、火山フロントより東側のマントルウェッジでは、ランダム不均質速度構造の自己相関関数がガウス型で表されるのに対し、火山フロント付近でガウス型より指数関数型にやや近づき、火山フロントより西側ではほぼ指数関数型になることを見出した。また、ランダム不均質性のスペクトル構造を推定した結果、長波長成分のゆらぎのパワーには特に地域性は認められないが、短波長成分の速度ゆらぎのパワーは火山フロント西側で強くなることを明らかにした。これは、沈み込み帯におけるマグマの生成・上昇過程を理解する上で、従来の決定論的な不均質速度構造の研究では得られなかった重要な情報を与えるものである。

以上のように、小原一成提出の論文は、同人が自立して研究活動を行うの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。よって、小原一成提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。