

# 論文内容要旨

(No. 1)

氏 名	椎名 高裕	提出年	平成 27 年
学位論文の 題 目	東北日本下における太平洋スラブの地震波速度・減衰構造と地震活動の関係		

## 論文目次

第1章	序論
第2章	海洋性地殻の地震波速度
2.1	はじめに
2.2	東北地方における海洋性地殻の P 波速度
2.2.1	PS 変換波の観測
2.2.2	解析手法の概要
2.2.3	結果
2.2.4	議論
2.3	北海道東部下における海洋性地殻の地震波速度
2.3.1	海洋性地殻内部を伝播するガイド波の同定
2.3.2	数値実験による後続波の伝播過程の検証
2.3.3	海洋性地殻の地震波速度の推定
2.4	まとめ
第3章	太平洋スラブの地震波減衰構造
3.1	はじめに
3.2	解析手法の概要
3.2.1	コーナー周波数の推定
3.2.2	地震波減衰の推定
3.2.3	地震波減衰トモグラフィ
3.3	太平洋スラブにおける P 波の減衰
3.3.1	コーナー周波数の推定
3.3.2	減衰の推定
3.3.3	議論
3.4	太平洋スラブの 3 次元地震波減衰構造

## 3.4.1 解析手法の概要

## 3.4.2 解の信頼性

## 3.4.3 結果と議論

## 3.5 まとめ

## 3.5.1 解析の結果

## 3.5.2 課題と今後の展望

## 第4章 議論

## 4.1 海洋性地殻の不均質構造と水の分布

## 4.2 海洋性地殻の地震活動と周辺域の不均質構造

## 4.3 水循環過程に対する考察

## 4.4 今後の展望

## 第5章 結論

## 論文内容要旨

沈み込み帯における地震・火成活動には、沈み込む海洋プレートとともに地球内部に運び込まれる含水鉱物が重要な役割を果たしている。海洋性地殻やスラブマントルに存在する含水鉱物は、沈み込みに伴う温度と圧力の増加により脱水反応を生じ、周囲へ水を放出する。そのようにして放出された水は、上面地震帯や二重深発地震面などのスラブ内地震の発生、および島弧マグマ活動と密接に関係していると考えられている。水の存在は地震波速度や地震波減衰の異常域として観測される。このため、各地の沈み込み帯で詳細な地震波速度・減衰構造の推定が精力的に行われ、マントルウェッジでのマグマの上昇経路の理解やスラブ内地震の発生メカニズムの解明が進められている。

東北日本沈み込み帯は、世界で最も地震・火成活動の理解が進んでいる地域の一つである。例えば、マントルウェッジ内の微細構造の推定により、地震波不均質構造とマントル対流やマグマの生成・上昇過程の関係などが明らかになり、マントルウェッジから島弧地殻にかけての水やメルトの上昇モデルが提案されている。一方、東北日本下に沈み込んでいる太平洋プレート（スラブ）内部の詳細な不均質構造の理解はまだ十分でない。これは、スラブ最上部に位置する厚さ約 7 km の海洋性地殻の構造を十分な精度で推定することが難しいこと、マントルウェッジとスラブの不均質構造の影響を分離することが困難であることなどが主な要因である。海洋性地殻やスラブマントルは地球深部への水の主要な担い手であり、そこでの水の分布を明らかにすることは、島弧マグマ活動やスラブ内地震の発生の理解に寄与するだけでなく、マントル遷移層への水輸送過程のモデル化にも重要である。

そこで本研究では、沈み込み帯における水循環やスラブ内地震の発生メカニズムの解明を目的として、太平洋スラブの詳細な地震波不均質構造を推定し、得られた結果と地震活動の比較を行った。まず、東北地方と北海道東部において海洋性地殻の地震波速度構造を推定した。東北地方では、スラブ内地震で観測される太平洋スラブ上部境界で生じた PS 変換波に注目し、読み取った到着時刻データに地震波速度トモグラフィ法を適用することで、海洋性地殻の P 波速度構造を推定した。北海道東部では、海洋性地殻内を伝播する後続波（ガイド波）の走時を用いて P 波、S 波速度を推定した。なお、このガイド波は北海道東部のスラブ内地震でしばしば観測される後続波であり、本研究においてはその伝播経路や発生の原因を詳細に検討し、観測された波群がガイド波であることを確認した上で速度構造解析を行った。推定された海洋性地殻の P 波速度は、東北地方では前弧域下で 6.5-7.5 km/s、背弧域下で 7.5-8.5 km/s と

なり、北海道東部では前弧域下で 6.5-8.0 km/s であった。また、北海道東部の前弧域で観測された S 波速度は 3.5-4.0 km/s,  $V_p/V_s$  は 1.80-1.85 程度であった。両地域において、海洋性地殻の P 波速度は深さとともに徐々に速くなるという特徴を示し、深さ 80 km 以浅では含水 MORB から期待される速度よりも 15% 程度遅く、それ以深では MORB モデルから期待される速度とほぼ一致する。MORB 内の含水鉱物に加え、1vol% 程度の流体の水を仮定すると深さ 80 km 以浅で観測された低速度異常を説明することができる。含水鉱物の脱水反応が深さ 80-100 km 付近で起こり、そこで放出された水が海洋性地殻内に高間隙圧水として存在していると推測される。さらに、地震波速度が著しく遅い深さ範囲は海洋性地殻内の活発な地震活動（上位面地震帯）の範囲とほぼ一致するという特徴も明らかになった。この観測事実は、地殻内地震の発生には水が深く関与していることを強く示唆しており、地震発生モデルとして脱水脆性化説を支持している。一方で、北海道東部の深さ 80-100 km 付近の P 波速度は、東北地方に比べ 0.5 km/s ほど速いことも明らかになった。東北地方、北海道東部とも深さ 70-90 km で上面地震帯が観測されていることを考えると、海洋性地殻の温度構造が大きく異なるとは考えにくい。東北地方に比べて北海道東部のマントルウェッジの温度が高温であるためにスラブ直上のカンラン岩の二面角が小さく、海洋性地殻からマントルウェッジへ水が流出して、地殻の水の量が東北に比べて少ないことが、この速度差の原因となっている可能性が考えられる。

続いて、東北地方下における太平洋スラブの地震波減衰構造の推定を行った。ここでは、マントルウェッジを伝播する波線の経路がほぼ一致するスラブ内地震どうしの地震波形のスペクトル比をとることで、マントルウェッジ以浅の減衰の影響やサイト特性の影響を最小限にし、太平洋スラブの減衰を高い精度で推定することを試みた。ただし、このようなスペクトル比は、地震の震源特性（震源スペクトル）に関する情報も含まれている。このため、震源スペクトルの形状と減衰パラメータ ( $\Delta t^*$ ) が強くトレードオフするという問題点がある。この問題点を解決するために、本研究ではまず、震源スペクトルの形状を規定する主要なパラメータであるコーナー周波数を S 波コーダスペクトル比法により、減衰パラメータとは独立に推定した。この方法により、震源スペクトルの形状と減衰パラメータが強くトレードオフするという問題点を解決することができた。次に、得られたコーナー周波数を用いて、波線がほぼ重なりあう 2 つの地震の初動スペクトル比をモデル化することで、イベント間の媒質の減衰パラメータを決定した。この手法により、2,954 個のイベントペアに対して、イベント間の平均的な P 波減衰を推定することができた。得られたスラブ内部の平均的な P 波減衰は  $Q^{-1} = 0.016 \pm 0.051$  であり、先行研究で得られた減衰とほぼ同程度である。なお、スペクトル比法によりスラブ内の減衰を推定した際に、解析データ全体の約 35% で負の減衰 ( $\Delta t^* < 0$ ) が推定された。負の減衰の原因を考察したところ、コーナー周波数の推定誤差や現実の震源スペクトルと仮定した震源スペクトルの差に起因する誤差の影響が大きいたことが明らかになった。最後に、直達波のスペクトル比法で求めたイベント間の減衰パラメータを用いて、太平洋スラブの 3 次元 P 波減衰構造の推定を行った。推定された 3 次元減衰構造をみると、太平洋スラブ最上部付近（スラブ上部境界から 10 km）の減衰がスラブマントル中央部（スラブ上部境界から 35 km）の減衰より大きい。また、先行研究より地震波低速度域が存在することが指摘されている上面地震帯や 2003 年宮城沖地震（M7.1）の震源域近傍ではやや大きな減衰が推定された。流体や含水鉱物（角閃石や蛇紋石など）の存在は減衰を大きくすることが知られていることから、減衰のやや大きな領域には流体が存在していることが強く示唆される。本研究で推定した地震波減衰は地震波速度とは独立した情報であり、また流体の存在は地震波速度と減衰に異なる影響を与えることから、本研究の成果はスラブ内の流体分布の解明に重要な制約条件を与えると考えられる。

本研究で得られた海洋性地殻の速度構造の深さ分布、およびスラブの 3 次元 P 波減衰構造は、太平洋スラブ内の水の分布や地震の発生メカニズムに対して、極めて有益な情報を提供すると考えられる。特に、スペクトル比法を用いたスラブ内の減衰構造の推定は、世界で初めての試みであり、他の沈み込み帯における減衰構造推定の一つの解析手法としてその有益性を示したことは本研究の特色である。しかしながら、今後の研究に向けていくつかの課題もある。一つ目は、波線分布の制限から北海道東部における海洋性地殻の面的な速度構造を推定することは困難であったことである。本研究では海洋性地殻のガイド波を用いて解析を行ったが、東北地方と同様にプレート上部境界での PS 変換波を同定し、その到着時刻を用いることで、地殻内のより詳細な速度分布の推定が可能になると考えられる。二つ目はスラブの減衰解析における負の減衰である。本研究ではその原因をいくつか考察し、震源パラメータのモデル化に起因する誤差がその大きな要因であることを示した。一方で、それ以外にも本研究では考慮されていない、スラブマントルのラミナ状の短波長不均質や海洋性地殻内での多重散乱など、減衰構造の推定に影響を与えるいくつかの要因がある。これらの要因を定量的に評価することは現段階では容易ではないが、数値モデルの高度化や S-net による海域での稠密観測によるスラブ内を長く伝播する地震波の収集、計算手法の改良などにより、より精度の高い減衰構造の推定が可能になると考えられる。沈み込み帯のスラブ構造解析の今後の研究の進展に期待したい。

## 論文審査の結果の要旨

プレート沈み込み帯における地震・火山活動は、沈み込んだプレート内に取り込まれた水が大きな役割を果たしているというモデルが、近年、考えられている。これまでに陸の地殻内やマントルウェッジの構造が詳しく調べられ、このモデルの妥当性が検証されてきたが、沈み込んだスラブ内の詳細な構造を調べた研究はほとんど存在しない。

本論文では、まずスラブ内地震の後続波に注目して、沈み込んだ海洋性地殻内の地震波速度を高精度で推定した。東北地方においては PS 変換波を用いて、トモグラフィによって地震波速度の分布の推定に成功した。北海道東部においては、海洋性地殻内にトラップされて伝播されてきた波を用いて、海洋性地殻内の速度の深さ分布を推定した。推定された海洋性地殻内の地震波速度は、両地域ともに 80km 以浅では MORB モデルから期待される地震波速度よりも 15%程度遅く、また、地震波速度が著しく低い深さ範囲は、海洋性地殻内の地震活動が活発な領域と一致することを本論文は明らかにした。これらの結果から、海洋性地殻内の含水鉱物の相転移によって放出された水が 1 vol% 程度存在しており、それによって海洋性地殻内の岩石の強度が下がり、地震が活発に発生していると考えられる。

次に、本論文では、沈み込むスラブ内の 3 次元地震波減衰構造を世界で初めて高精度で推定することに成功した。これは、波線が重なる地震のペアを選んでスペクトル比を取ることで、スラブ内以外の構造の影響を除去し、また震源スペクトルは S 波コーダスペクトル比法により減衰パラメータとは独立に推定するといった、極めて慎重な解析が功を奏したものである。さらに、様々な検討により、 $Q$  が負になる場合があるのは、震源スペクトルの多様性に起因することも初めて証明した。スラブ内地震の活発な領域で大きな減衰が得られており、これは流体が存在しているところで減衰が大きくかつ地震活動が活発となっていることを示唆する。

以上のように、椎名高裕提出の論文は、世界最高の分解能と信頼度でスラブ内の地震波速度・減衰構造を推定することにより、沈み込み帯の水の供給路および地震発生と水の関係の解明において重要な貢献をしている。このことは、同人が自立して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おり、したがって、椎名高裕提出の論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。