

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540421

研究課題名 (和文) 地球内部深さ 200 km の謎に関する地震学的研究

研究課題名 (英文) Seismological study of enigmas around depth 200 km of the Earth

研究代表者

久家 慶子 (KUGE KEIKO)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50234414

研究成果の概要：地震波でみる上部マントル構造は、表層 200 km に特徴をもつ。大陸域では、表層 200 km に高地震波速度・低速度勾配・低減衰の領域をもつ構造が、観測される地震波を説明する。化学組成の違いと関係する可能性がある。沈み込み帯では、地震波速度不連続の不均質構造や低減衰がみられる。一部は、沈み込むプレートの表れと考えられる。200 km 以浅の沈み込むプレートの構造は、地震の起こり方の特徴から、水の分布に関係している可能性がある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	540,000	3,940,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地震波、プレート、マントル、地震

1. 研究開始当初の背景

プレートテクトニクスは、地表でおこるさまざまな地学現象を容易に説明する概念であるが、いくつかの自明でない問題が残されている。その中には、「プレートは何なのか」「プレートの境はどのような境界・状態であるのか」などが含まれる。

これまでの研究から、非常に古い大陸を除くと、多くの大陸プレートが約 200 km 程度の厚さをもつことがわかっている。この深さには、古くから、謎めいた地震波速度の不連続の存在も指摘されてきた。200 km という

深さは、沈みこむ海洋プレート内の地殻含水鉱物の脱水反応が起こる下限あたりにも位置する。島弧火山の活動は、おおむね、沈み込むプレートが深さ 200 km 以浅にあたる部分の上方でのみ生じている。

温度がプレートの構造を支配する主要因であることに間違いはないが、それだけではない可能性は指摘されてきた。その可能性を明らかにするには、プレート内部、そしてそこから周辺のアセノスフェアにわたる領域での地震波速度や減衰等の変化が鍵となる。が、プレート内部にあたる海域や大陸ではこれらの値の推定は容易ではない。

2. 研究の目的

プレートとは何なのか(何に規定されるのか)、地球の深さ 200 k m 付近を境界に何がかわるのか、それらをどのように検出するのか、本研究のターゲットである。これに向けて、地震波の反射波等を利用して、大陸域や海洋域でのリソスフェア(プレート)―アセノスフェアにわたる上部マントル構造を推定する。温度以外の要因がプレートの構造を規定する可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) P・PP 波、S・SS 波の波形でみる上部マントル構造

広帯域地震計で記録された P・PP 波、S・SS 波の波形は、長周期成分を抜き出すことによって、理論波形との比較が可能である。複数の異なる速度モデルの理論波形の比較を実施した結果、特に、震央距離 20 度以下、25–45 度の波形が、上部マントル速度構造の影響を受けやすい。この距離で観測された波形と理論波形の比較をもとに、上部マントル構造を調査できる。

調査対象は、オーストラリア北部を中点として大陸域を通る P・PP 波、S・SS 波の波形である。オーストラリア北域では、プレートの沈みこみに伴う地震が多数発生する。オーストラリアでは、オーストラリア全域を順に移動する広帯域地震観測網のキャンペーン観測が過去に実施されており、この時の広帯域地震データが利用できる。

(2) 長周期 ScS 多重反射波波形およびレシーバー関数で検出する上部マントル構造

少ない広帯域観測点と大地震でも解析が可能であるという利点から、ScS 多重反射波波形とレシーバー関数を使用して地殻・マントル構造を推定した。ScS は地表と核・マントル境界の間を何度も反射する S 波である。その一連の波形は、マントルの S 波の速度や減衰(Q 値)とともに、地殻やマントルの不連続面の深さや SS 反射係数を記録する。本研究では、波線理論をもとにした理論 ScS 波形で観測 ScS 波形を復元することにより、これらの値を推定した。特に、震源継続時間の影響を理論波形に加えた点が新しい。一方、レシーバー関数は、P 波の大円方向成分と上下動成分の波形から求められ、観測点下の速度不連続で発生する PS 変換波の情報に富む。速度不連続面の深さや変換係数が推定でき、特に浅部の不連続面の詳細な構造を知ることができる。

調査対象地域は、南アメリカ中緯度地域とオホーツク海島弧とした。

南アメリカの南緯 20 度付近は、西岸にはアンデス山脈が存在し、その下にナスカプレートが太平洋側から東方へ沈み込む。一方、東側には安定した大陸塊が残る。沈み込み帯付近で多くの地震が発生するが、南米大陸での地震観測点の空間密度は低く、内部構造に関する研究は少ない。が、世界の他の地域と比して、大深発地震を ScS 多重反射波の解析に適した近距離で記録している利点がある。本研究では、南アメリカの東側と西側の違い、つまり大陸域と沈み込み帯域との違いに注目しながら、南アメリカの南緯 20 度付近の地殻・上部マントル構造を調べた。

一方、カムチャッカ半島西側で、2008 年に深発大地震(Mw7.7)が発生した。この地域には過去に Mw>7 の大地震発生の記録はなく、ほとんどが Mw<6 の地震活動である。本研究では、この珍しい大地震の ScS 多重反射波の波形記録を用いて、オホーツク海域での地殻・上部マントル構造の特徴を調査した。

(3) 温度以外の要因がプレートの構造を規定する可能性

プレートの構造を規定する温度以外の要因の可能性のひとつとして、上部マントル内に存在する水の存在があげられる。本研究では、上部マントルに不均質に存在する水の痕跡の検出を試みた。本研究では、従来の地震波を用いた構造探査的手法ではなく、大地震の震源過程を通して水の不均質構造を検出するという、世界的にも画期的な手法を試みた。

① 水の存在が地震の震源過程に与える影響

まず、熱・流体が実地震規模の 3 次元断層の動力学的破壊過程に及ぼす影響を、3 次元差分法による数値シミュレーションから調べた。

シミュレーションでは、均質な無限弾性媒質中に、1 枚の矩形断層をおいた。断層上にかかる応力は一様である。小さな領域で応力降下を起こして破壊を開始させたあとは、断層の構成則に従って、自然に破壊が断層上を広がっていく。断層の構成則は、クーロン応力をもとにしたすべり弱体化則で、実効法線応力に、摩擦熱によって時間変化する間隙圧の効果を入れた。静・動摩擦係数、臨界すべり距離は断層上で一様とした。

② 水の存在の影響を受けた可能性のある稍深発地震の探索と調査

一方、①の結果をもとに、水の影響の可能

性を実際に調査できるようなプレート内大地震を探した。

1976年以降、深さ80-300kmの範囲で発生した最大地震(Mw7.8)の一つが、2005年チリ北部で発生した地震である。地震の深さは約110km。本研究のターゲットとなる深さからはやや浅いが、この地震は、全世界規模の広帯域地震観測網で記録された豊富な遠地地震波形記録とともに、地域的距離にあるチリ大学所有の広帯域強震計の地震波形データが利用できるという点で、稀な大地震である。また、この地震の余震はほぼ水平に分布しており、沈み込むプレートを横切るように、広い範囲で断層運動が起こったことが覗える。

以上の点から、このチリ北部の地震を調査対象とした。遠地・地域的距離の両方の地震波波形データから、震源破壊モデルを構築し、それらと①の結果を使って、水が関与する可能性とその分布との関連を検討した。

4. 研究成果

(1) P・PP波、S・SS波の波形でみる上部マントル構造

オーストラリア北部を中点として大陸域を通るS・SS波の波形は、表層約200kmが高速度・低速度勾配、その下に低速度領域をもつ地震波速度モデルによって説明できる。東南極大陸で推定した速度モデル(表層約200kmが高速度・低速度勾配)も、似た理論波形をもたらしている。一方、P・PP波の波形も、表層約200kmに高速度層、その下にやや低速度領域をもつ速度モデルによって説明できるが、深さに対する速度の変化はS波速度ほどに大きくない。このP波・S波速度の構造の違いは、東南極で指摘されたような大陸プレートの化学組成の違いで説明できる可能性がある。

(2) 長周期ScS多重反射波波形およびレシーバー関数で検出される上部マントル構造

南アメリカの地殻及び上部マントル構造は、西側と東側で異なる結果となった。長周期ScS波多重反射波波形とレシーバー関数のいずれの解析でも、モホ面の深さは、西側で東側より深く決定された。レシーバー関数の波形合わせにより、西側には25-70kmの深さに4つの速度不連続があることがわかった。PS変換波の走時から、深さ60km付近の不連続面は傾斜していると思われ、大陸のモホではなく、沈み込む海洋プレートの上面付近の可能性もある。また、ScS波解析の結果から、南アメリカ西側の上部マントルは平均的にS

波の減衰が小さい(高Q)可能性がある。マントル遷移層の厚さと温度から推測されるQ値との比較から、原因となる高Qの領域は、上部マントル約200km以浅の最上部にあると推測される。一方、南アメリカ東側の上部マントルのQ値は、西側に見られるほどに大きくはないが、日本海、ボニン、オホーツク海の海域で求められた値より大きい。410km、660kmの不連続面の深さに差があまりないことから、Q値の違いの原因は上部マントルの最上部にある可能性がある。南アメリカ東側のモホ面とコンラッド面は40kmと22kmに決まった。大陸の典型的な値である。

オホーツク海島弧で決定された地殻・上部マントルの構造は、全般に、日本海下の構造に類似する。地殻の厚さは南アメリカより薄く、ボニンよりも厚い。上部マントルのQ値は、日本海やボニンの値に近い。南アメリカにみられたような高Qは見られない。一方、下部マントルのQ値は高い値に推定された。島弧に沿って、660km不連続の深さとともに変化している可能性がある。

(3) 温度以外の要因がプレートの構造を規定する可能性

① 水の存在が地震の震源過程に与える影響

水が存在すると、そのもともとの間隙圧によって、強度(静摩擦)と動摩擦が下がる。更に、ある程度、断層幅が狭く、流体の拡散係数が小さいと、断層でのすべりの進展とともに、摩擦熱による間隙圧上昇の効果が、震源過程に顕著に影響する。

摩擦熱による間隙圧上昇は、応力降下量を大きくし、すべり量を増加させる。応力降下とすべり量の関係は非線形になる。これらの効果は、破壊伝播距離の増加とともにきくので、断層上の位置によって変化する。そのため、平面断層上で応力や摩擦係数などが一樣な場合でも、摩擦熱による間隙圧上昇が働くと、すべり量等の分布が複雑になることがわかった。

② 水の不均質分布の表れと思われる地震の震源過程

チリ北部の地震の震動は、チリ大学が所有する距離数百km内の複数の広帯域強震計に記録された。その地震波形から決定した断層上でのすべりの時空間分布は、大きなすべりをもつ、東西に並ぶ2つの領域によって特徴づけられる。震源に接する東の領域がすべった後、しばらくして西側の領域がすべる。興味深いことは、この特徴が、プレート内部の水の不均質分布によって巧みに説明できる点にある。2つの大すべり領域は、チリで

みつかっている二重深発地震面の位置関係や応力場と調和する。二重深発地震面では脱水反応が示唆されている。2つの大すべり領域が水のある領域、それ以外が水のない領域と考えると、①のシミュレーションでよく説明できる。水の有無の分布が、すべり量の不均質の特徴をうまく生み出せる。

この結果は、沈み込むプレートが、地殻・マントルの両方の部分で地球内部に水を運んでいることを示唆する。水の分布は、温度とともに、プレートの構造を規定する要因になっている可能性がある。今後、このような調査を拡張することで、プレート内部における水による不均質構造、温度・圧力との関係などが明確になることが予想される。また、周辺のアセノスフェアへの水の供給源としての特性もわかるだろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Urata, Y., K. Kuge, Y. Kase, Heterogeneous rupture on homogeneous faults: Three-dimensional spontaneous rupture simulations with thermal pressurization, *Geophysical Research Letters*, 35, L21307, doi:10.1029/2008GL035577, 2008, 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① Kuge, K., Y. Kase, Y. Urata, J. Campos, A. Perez, The 2005 Tarapaca, Chile, intermediate-depth earthquake: Evidence of heterogeneous fluid distribution across the plate?, *American Geophysical Union 2008 Fall meeting*, 16 December 2008, San Francisco, USA
- ② Kuge, K., Y. Kase, Y. Urata, J. Campos, A. Perez, The 2005 Tarapaca, Chile, intermediate-depth earthquake: Evidence of heterogeneous fluid distribution across the plate?, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008, Fall meeting, 26 November 2008, Tsukuba, Japan
- ③ Kuge, K., M. Kato, Crust and mantle structure beneath Sea of Okhotsk

deduced from multiple ScS reverberation waveforms, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, 2008, Fall meeting, 25 November 2008, Tsukuba, Japan

- ④ Okaue, Y., K. Kuge, M. Kato, Crustal and upper mantle structure beneath Central South America deduced from ScS reverberation waveforms and receiver functions, *American Geophysical Union 2007 Fall meeting*, 12 December 2007, San Francisco, USA
- ⑤ Okaue, Y., K. Kuge, M. Kato, Crustal and upper mantle structure beneath Central South America deduced from ScS reverberation waveforms and receiver functions, *The International Union of Geodesy and Geophysics XXIV General Assembly*, 6 July 2007, Perugia, Italy
- ⑥ 岡上雄介, 久家慶子, 加藤護, Crustal and upper mantle structure beneath 20S of South America, 日本地球惑星科学連合 2007年大会、2007年5月23日、千葉幕張

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久家 慶子 (KUGE KEIKO)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50234414

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

岡上 雄介 (OKAUE YUSUKE)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生
浦田 優美 (URATA YUMI)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生