



「もっと知りたい方々のために」

- 地震波で見る最新の地球内部の姿 -

1. 地球内部の熱対流運動

- 2. 沈み込み帯の火山の成因
- 3. 内陸地震の震源断層への深部からの水の供給
 - 4. 東北沖地震の震源域で何が起きたか



・地震波トモグラフィ により、地球 内部を覗き詳細な構造を知ること が可能となった。

・地震波トモグラフィとは? → 医学のCTスキャンと同じ原理 により、多数の地震計で観測した 多数の地震のデータを使って、コ ンピュータで地球内部構造を写し 出す。

地震波トモグラフィで得られた地球内部のP波速度の分布

1. 地球内部の熱対流運動

・地震の根源的な原因は地球 内部の対流運動。では、対流 はどのように起こっているのだ ろうか?

・対流の下降流部分は、沈み 込む海洋プレート

・図1で、青の高速度域が、斜めに沈み込む太平洋プレート。 その下端が深さ約660kmに達するとほぼ水平となり、中国大陸の下まで伸びる。

マントル物質は深さ660kmで
高密度の結晶構造に変化(相
転移)。この境(660km不連続
面)を超えると密度が急に増加

・深さ660kmを境に、マントルは上部マントルと下部マントルと下部マントル

・海洋プレートは、冷たくて重 いので自重で上部マントル中 を沈降。やがて 660km不連続 面に達すると、密度の大きい 下部マントル中には沈み込め ず、上部マントルの底に横た わる。



図1 日本列島周辺のP波速度の分布。右下地図の黒線に沿うP波速度の鉛直断面 P波速度を速度偏差としてカラースケールで表示。速度偏差は平均より何%速いか遅い かを示す。〇は震源を表す。

1. 地球内部の熱対流運動

(2)世界の沈み込み帯で見つかった沈み込んだ海洋プレートの様々な姿

・上部マントルの底に横たわった海 洋プレートは、その後どうなるだろう か? 世界の沈み込み帯で得られた 海洋プレートの姿に、その答えが現 れている。

・図2は、世界のいくつかの沈み込み 帯のP波速度の鉛直断面

•日本、南千島:

沈み込んだ太平洋プレート(黒矢印) は、660km不連続面の上に横たわる。

・アリューシャン、小笠原: 660km不連続面の上に横たわった太 平洋プレートの先端の一部が下部マ ントルに沈み込み始めている。

・中米、インドネシア、トンガ、南米: 上部マントルの底に横たわっていた 形のまま、660km不連続面を通り越 して下部マントルまで沈み込んでい る。

•北米:

下部マントルの下部にまで沈み込んでいる。

・これら多様な沈み込むプレートの姿が、上部マントルから下部マントルへ 沈み込むプレートのいろいろな段階 を示すと考えられる。



図2 世界の沈み込み帯のP波速度の分布 海溝に直交する測線に沿ったP波速度の鉛直断面 青が高速度、赤が低速度

1. 地球内部の熱対流運動 (3)下降流部分が沈み込む海洋プレート、上昇流部分がプリューム

・上部マントルの底に横たわるプレートは、その後どうなるだろうか? 時間の経過とともに、少しずつ高密度の結晶構造へと変化
(相変化)→ やがて大部分が変化し、密度が下部マントルより大きくなる → 一気に下部マントルへと落下する と考えられる。
・落ちていった先はどうなるだろうか? 図3(A)の左上部分に、核の直上に青色の高速度域(青矢印)が広く分布。このように、一気に落下した海洋プレートの残骸は、核の直上に溜まる。これらが、対流の下降流部分

・対流の上昇流部分は、プリューム。図3(A)で見られる、核の直上から地表まで続く2つの赤色の低速度域(赤矢印)が、太平洋 スーパープリュームとアフリカスーパープリューム

・速度分布などから推定された地球内部の対流運動の模式図を、図3(B)に示す。



図3 (A)地球内部のP波速度の分布 (B)地球内部の対流運動の模式図

2. 沈み込み帯の火山の成因

・沈み込み帯では、冷たい海洋プレートが沈み込むのに、なぜ熱いマグマが 噴出し火山が形成されるのだろうか?

・図4で、青色の高速度域が、斜めに
沈み込む太平洋プレート。その厚さ約
80km

・その直上のマントルウェッジ内に、太 平洋プレートとほぼ平行に傾斜した赤 色の低速度域(赤矢印)がみられ、そ れは▲で示した火山直下まで達してい る。

・これは、マントルウェッジ内の上昇流 に対応し、その中に溶融物(マグマ)を 含む。それが地表に噴出すると火山が 形成される。

・火山を通過しない測線に沿う鉛直断 面(図4(c)と(e))では、火山を通過する 測線に沿う鉛直断面(図4(a)、(b)、(d)、 (f))と較べて、傾斜した低速度域の赤 色が薄い、つまり、速度の低下率が小 さい。

 このことは、マントルウェッジ内の上 昇流の速度の低下率の大小が、地表 で火山を形成させるか否かを決めてい ると推定させる。



(1)プレート直上のマントルウェッジ内の上昇流

Nakajima et al., JGR (2001)

図4 東北日本のS波速度の分布。右下地図の黒線に沿ったS波速度の鉛直断面 (島弧横断鉛直断面)。▲は火山、〇は震源を表す。

2. 沈み込み帯の火山の成因



・低速度の度合いの大きい領域 が、南北方向に約80kmの間隔で 周期的に出現(赤矢印)

・図5(a)と比較すると、地表の火 山および地形の高まり(黒矢印) と上昇流内の低速度の度合いの 大きい領域(赤矢印)とが空間的 にほぼ一致

・つまり、マントルウェッジの上昇 流内の速度低下率の大小が、地 表で火山を形成させるか否かを 決めている。

(2)地形および火山の分布と対応する上昇流内のS波速度の分布



Hasegawa & Nakajima (2004)

図5 (a)地形 (b)マントルウェッジ内の低速度層に沿うS波速度の分布 ●は第四紀火山、〇は深部低周波地震を表す。

2. 沈み込み帯の火山の成因 (3)マントルウェッジ内の2次対流と火山生成モデル

・プレートの沈み込みに伴って、図6に ℓ で示すように、直上のマントル物質も引きずられて一緒に沈み込む → 空いた隙間を埋める ように、背弧側(日本海側)からマントル物質が上昇して来る(図6の ℓ)。つまり、プレートの沈み込みにより、マントルウェッジ内に2 次的な対流が形成される。この2次対流のうちの上昇流部分が、地震波トモグラフィで見つかった傾斜した低速度域(図6の赤い領 域)。

・この上昇流にプレートから吐き出された水が加わり、上昇流内の物質は部分的に溶融しマグマができる。

・それが地表に達すると火山を形成

・つまり、沈み込み帯で火山が形成される原因は、プレートの沈み込みにより形成される2次対流とプレートから吐き出された水

・上昇流は、図6右図のように、シート状の形状をし、島弧方向(南北方向)に速度低下の度合いが大きいところが周期的に出現 ・速度低下の度合いが大きいところからダイアピル状にマグマが上昇し背弧側の岩木山、鳥海山、月山などの火山を形成

・シート状の上昇流が地殻の底に到達する場所が脊梁山地 → そこに岩手山、栗駒山、蔵王山、吾妻山など帯状の火山列(火山フロ ント)を形成



3. 内陸地震の震源断層への深部からの水の供給 (1)2008年岩手・宮城内陸地震



・地震波トモグラフィは、内陸地震の震源断層に直下から流体が上昇する様子 も写し出す。

・図7(B)に示すように、2008年岩手・宮城内陸地震の震源断層(赤色長方形) は、南北に約40km、深さ方向に約10kmの拡がり

・震源断層の直下に、深部から立ち上がるように3本の明瞭な赤色の低速度域が存在。この低速度域は、マントルウェッジ内の深さ40km程度から、震源断層 直下の深さ10km まで伸びている。

・この低速度域は、水やマグマなどの流体を含む層と考えられている。

・つまり、震源断層直下にマントルウェッジから続く流体を含む層がある。



岡田・他(2008)

図7 2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)の震源断層周辺のS波速度の分布
(A)深さ 6, 12, 18, 24, 40kmにおけるS波速度(B)震源断層に沿うS波速度の鉛直断面
震源断層(赤色長方形)、本震(☆)、余震(〇)。震源断層直下にS波低速度域(流体を含む層)が存在

3. 内陸地震の震源断層への深部からの水の供給

(2)他の内陸大地震

・では、他の地震ではどうだろうか?

・図8は、震源断層周辺のS波速度構造

(a) 1962年宮城県北部地震(M6.5)

(b) 2003年宮城県北部地震(M6.4)

(c) 2004年中越地震(M6.8)

2007年中越沖地震(M6.8)

(d) 2007年能登半島地震(M6.9)

(e) 1995年兵庫県南部地震(M7.2)

(f) 2000年鳥取県西部地震(M7.2)

(g) 2008年岩手·宮城内陸地震(M7.2)

・いずれの地震も、震源断層直下の下 部地殻に顕著な低速度域(赤い領域) が認められる。

・つまり、いずれの地震も、岩手・宮城 内陸地震と同様に、震源断層直下に流 体を含む層が存在

・流体は軽いので次第に上昇すること を考えると、そこから直上の震源断層 に流体が供給されていることを推定さ せる。



図8 内陸で発生した大地震の震源断層周辺のS波速度の分布。(a)~(d) 断層に直交するS波速度の鉛直断面 (e)~(g) 断層に沿うS波速度の鉛直断面。震源断層(赤の太線あるいは赤色長方形)、本震(☆)、余震(● あるいは〇)。 いずれの地震も、震源断層直下にS波低速度域(流体を含む層)が存在

3. 内陸地震の震源断層への深部からの水の供給 (3)ニュージーランドの活断層

・次に、ニュージーランドの活断層を見てみよう。

- ・S波速度構造の代わりに、電気比抵抗構造を図9に示す。
- ・5つの活断層(赤の太線)全てで、直下の下部地殻に顕著な低比抵抗域(黄色の領域)が存在
- ・低比抵抗域は、S波低速度域と同様に、流体を含む層
- ・つまり、ニュージーランドでも、震源断層直下に流体を含む層が見いだされた。

・これらは、【断層に直下から流体が供給される → 断層強度が低下 → 地震が発生】という地震発生モデルを支持する観測事実



電気比抵抗をカラースケールで表示。青が高比抵抗、赤が低比抵抗。+は震源を表す。 各断層(赤の太線)直下に低比抵抗域(流体を含む層)が存在

4. 東北沖地震の震源域で何が起きたか (1)各地点の水平変位とプレート境界面上の滑り

・東北沖地震の震源域では何が起きたのだろうか?図10(a)は、GPS観測点(陸上)およびGPS-音響測距観測点(海底)で観測された東北沖地震による各地点の水平変位。東北沖地震によって各地点の地面は震源の方向に動いた(最大31m)。太平洋沿岸地域で最大1.2m沈降するなど、上下方向にも大きく動いた。

・これは、地震によってプレート境界面で大きな滑りがあったため。観測された各地点の変位量からプレート境界面上の滑りの分布が推定できる。それを、図10(b)に示す。プレート境界浅部の日本海溝の近くで最大50mを超える大きな滑りが推定された。



図10 (a) 東北沖地震による各地点の水平変位(矢印)。陸上では最大で5.3m、海底では最大31m動いた。 (b) 東北沖地震によるプレート境界面上の滑り分布。最大で50mを超える滑りがあった。☆は本震震源を表す。

11

4. 東北沖地震の震源域で何が起きたか (2)アスペリティ、条件付き安定滑り域、安定滑り域

・図11(b) に模式的に示すように、プレート境界面には、普段は固着していて地震で急激に滑るアスペリティ(固着域)がパッチ状に 分布。その周囲を、ズルズルとゆっくり滑る条件付き安定滑り域と安定滑り域が取り囲む。

・地震で大きく滑った領域がアスペリティ。従って、過去の地震の滑り分布が分かれば、アスペリティの分布が推定可能。それを示したのが、図11(a)の橙色のコンター

・東北沖地震の滑り分布(青のコンター)と較べると、東北沖地震では複数のアスペリティが連動して滑ったことが分かる。また、普段ズルズルとゆっくり滑っていると考えられていたアスペリティの周囲の領域(条件付き安定滑り域)も、地震で急激に滑った。



図11(a) 過去70年間のマグニチュード7以上の地震の滑り分布(橙色コンター)と東北沖地震の滑り分布(青コンター) (b) プレート境界面での滑り様式