

# 山陰地方における地震波速度構造と内陸地震発生の関係

津田寛大

## 1. 序論

本論文では、「内陸地震の断層において、どのように応力が増加するのか?」、「内陸地震のすべり分布は、何によって決まるのか?」という内陸地震の発生過程に関する、根本的ではあるが、未解決の2つの問いに答えることを試みた。特に、近年整備された稠密な地震観測網で得られたデータを活用することで、内陸地震の発生場の地震学的な構造を詳細に解明することを手がかりとした。1つ目の問い、「内陸地震の断層において、どのように応力が増加するのか?」を明らかにするために、内陸地震の発生が局在している地震帯・歪集中帯の成因を調べた。そのために、地震帯・歪集中帯の地震波速度構造にどのような特徴があるかを調べた。また、2つ目の問い、「内陸地震のすべり分布は、何によって決まるのか?」を明らかにするために、大規模な内陸地震の震源断層面上のすべり分布とその近傍の地震波速度構造の関係を調べた。

本論文では、山陰地方における地震波速度構造と内陸地震発生との関係を議論した。南海トラフ巨大地震の発生が迫る中、西南日本では内陸大地震の活動期に入っていると考えられており、山陰地方における内陸地震の発生過程を理解することは重要な課題となっている。

## 2. 山陰地方の下部地殻における地震波速度構造

### 2.1. はじめに

山陰地方では、日本海沿岸に沿って長大な帯状の地震分布が見られ、その帯状の地震分布は、山陰地方の地震帯と呼ばれている。山陰地方の地震帯では、 $M \geq 6.5$ の大規模な内陸地震も多発している。

なぜ、プレート境界から離れた山陰地方において、内陸地震の発生が局在するのか。その理由を説明するモデルとして、次のような内陸地震の発生過程モデルがある。地震帯直下の下部地殻に局所的な低粘性の領域 (weak zone) が存在し、大陸地殻が海洋プレートの沈み込みに伴う圧縮応力を受け、その weak zone に変形が集中することで、直上でせん断応力・歪速度が局所的に増大し、その結果として地震帯が形成されるというものである。本論

文では、山陰地方の地震帯の成因をこのモデルで説明できるかを検証するために、地震帯直下の下部地殻が weak zone であるかを調べた。

岩石は、高温である場合や岩石中に水が存在する場合、低粘性を示すことが知られている。また、岩石が高温である場合や岩石中に流体が存在する場合、岩石中を通過する地震波の速度は、遅くなることも知られている。すなわち、低粘性を示す岩石中を通過する地震波の速度は、遅い可能性が高い。そこで、本論文では、地震帯直下の下部地殻が低粘性であるか、すなわち weak zone であるかを検証するために、地震波走時トモグラフィー解析によって、地震帯直下の下部地殻が低速度域であるかを調べた。

## 2.2. 地震波走時トモグラフィー解析のデータと手法

地震波走時トモグラフィー解析の解析領域は、131°–136°E, 33°–36°N, 深さ 81km までとした。解析に使用した地震は、2001 年 1 月から 2016 年 12 月に解析領域内で発生した、 $M_j$  (気象庁マグニチュード)  $\geq 2.0$  の 13,657 個の地震である。初期震源位置および発震時刻は、気象庁の一元化震源を使用した。解析に使用した観測走時は、解析領域内の Hi-net 等の 291 点の定常観測点で、気象庁によって検出された、上記の地震からの 368,513 個の P 波走時、354,120 個の S 波走時である。

地震波走時トモグラフィーのプログラムには、FMTOMO というプログラムを使用した。FMTOMO には、波線追跡に波面法を用いることで、不均質の強い構造に対しても安定した波線追跡が可能であるという利点がある。速度グリッドの間隔は、水平方向に 0.1°, 鉛直方向に 7km とした。初期速度構造には、気象庁が震源決定する際に使用している 1 次元速度構造である JMA2001 を使用した。

## 2.3. 山陰地方の下部地殻における地震波速度構造と地震帯の成因

地震波走時トモグラフィー解析の結果、地震帯直下の下部地殻が低速度域であることが分かった。すなわち、地震帯直下の下部地殻は weak zone である可能性が高い。

本論文では、さらに、地震帯直下の下部地殻が低速度を示す要因を調べるために、温度および流体の存在を検討した。下部地殻における温度は、内陸地震の発生下限深度が浅いほど高く、深いほど低いと考えられる。そこで、地震帯直下の下部地殻が高温であるかを調べるために、山陰地方で発生した内陸地震の発生下限深度を推定した。

内陸地震の発生下限深度を推定した結果、地震帯直下の下部地殻の低速度域を、おおよそ 132.5°E を境に東部と西部に分けると、東部では、内陸地震の発生下限深度が浅い一方で、西部では、東部に比べ深いことが分かった。すなわち、東部では、温度が高いと考えられ、その高温が低速度の大きな要因となっていることが示唆される。加えて東部では、比抵抗構造を推定した先行研究によって、低比抵抗異常域の存在が確認されており、局所的に水

が存在すると考えられる。その局所的な水の存在も低速度の一因となっていることが示唆された。

さらに、東部が高温かつ局所的に水が存在する理由および、西部が東部に比べ高温ではないにも関わらず、低速度を示す要因について議論した。その際、本論文より広域の解析領域で、大局的な地震波速度構造を推定した先行研究の結果を参考にした。東部の直下では、高温のマントル上昇流がモホ面付近まで到達していることで高温となっており、さらにマントル上昇流に含まれるメルトが冷却され固化する際に、脱水した水が下部地殻に侵入していると考えた。一方で、西部の直下では、マントル上昇流はフィリピン海 (Philippine Sea, PHS) プレートに阻まれ、モホ面付近まで到達することができず、高温にはなっていないが、PHS プレートから脱水した水が下部地殻に浸入することで、低速度を示していると考えた。

つまり、地震帯直下の下部地殻の東部では、マントル上昇流による高温および、マントル上昇流から脱水した水の存在により低粘性となっており、西部では、PHS プレートから脱水した水の存在により低粘性となっていることが示唆される。すなわち、地震帯直下の下部地殻は、weak zone である可能性が高く、weak zone に変形が集中することで、直上でせん断応力・歪速度が局所的に増加し、地震帯が形成されていることが示唆される。

### 3. 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の震源域における地震波速度構造

#### 3.1. はじめに

2016 年 10 月 21 日に、山陰地方の地震帯内の鳥取県中部で M6.6 の大規模な内陸地震 (2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震、以下では、鳥取県中部地震と呼ぶ) が発生した。鳥取県中部地震の震源域では、本震発生の翌日から、京都大学・九州大学・東京大学地震研究所の合同地震観測班により、稠密余震観測が行われた。鳥取県中部地震のすべり分布の成因を明らかにするために、稠密余震観測データを使用した地震波走時トモグラフィー解析によって、本震の震源断層面近傍における詳細な地震波速度構造を推定し、先行研究により推定された本震のすべり分布と比較した。

#### 3.2. Double-Difference Tomography 法と解析に使用したデータ

地震波走時トモグラフィーのプログラムには、Double-Difference (DD) Tomography 法を用いたプログラムである、tomoDD を使用した。DD tomography 法では、通常地震波走時トモグラフィー解析で用いられる走時残差についての観測方程式に加え、近接する地震ペアから同一観測点への地震波の走時残差の差も観測方程式として同時にインバージョンすることで、地表付近の不均質構造の影響を相殺し、震源近傍の地震波速度構造と相対震

源位置を精度よく推定することができる。

地震波走時トモグラフィー解析の解析領域は、133.7°–134°E, 35.3°–35.5°N, 深さ 16km までとした。解析に使用した地震は、2016 年 10 月 24 日から 2016 年 12 月 5 日に解析領域内で発生し、P 波と S 波の走時がともに 20 点以上で手動読み取りされ、震源決定精度が非常によいと考えられる、2,552 個の地震である。解析に使用した観測走時は、解析領域内の 69 点の観測点（臨時余震観測点 67 点, Hi-net の定常観測点 2 点）で、手動読み取りされた、上記の地震からの 97,537 個の P 波走時, 63,044 個の S 波走時である。解析に使用した相対走時は、手動読み取りされた走時の差を用い、P 波, S 波について、それぞれ 249,057 個, 154,411 個である。

速度グリッドの間隔は、水平方向には余震域において 2km, 余震域の外側では 3km とし、鉛直方向には全域で 2km とした。また、インバージョン解析では、初期値に適切な値をあたえることが重要である。そこで、1 次元速度構造と震源位置、観測点補正値を同時に推定するインバージョンのプログラムである、VELEST を使用して、適切な 1 次元速度構造と震源位置、観測点補正値をあらかじめ推定し、それらを地震波走時トモグラフィー解析の初期速度構造と初期震源位置として使用した。

### 3.3. 鳥取県中部地震の震源域における地震波速度構造とすべり分布の成因

鳥取県中部地震のすべり分布を、強震波形インバージョンにより推定した先行研究では、鳥取県中部地震は 2 つの主なすべり域を持つことが示されている。本論文における、地震波走時トモグラフィー解析の結果、その 2 つの主なすべり域が地震波速度の高速度域に、2 つの主なすべり域の間に位置するすべりの小さかった領域が低速度域に対応することが分かった。大規模な内陸地震のすべり分布と震源断層面近傍の地震波速度構造を比較した多くの先行研究においても、主なすべり域が高速度域に対応していると報告されているが、両者の位置が対応する具体的な理由は示されていない。

本論文では、すべりが大きかった高速度域および、すべりが小さかった低速度域における岩石の特性を推定することで、主なすべり域が高速度域に対応する理由を議論した。岩石の特性を推定する際には、先行研究で理論的な解析により求められた、固液複合系（固体中に流体を含むポアが存在する系）における弾性波速度とポアの状態の関係を用いて、地震波速度構造から震源断層面近傍の岩石に含まれるポアのアスペクト比と体積分率を推定した。

岩石の特性を推定した結果、すべりが小さかった低速度域では、すべりが大きかった高速度域に比べ、ポアの体積分率が大きい（クラック密度が高い）ことが分かった。その低速度域では、クラック密度が高いことで非地震性の非弾性変形が卓越し、本震の発生前に大きな弾性歪が蓄積されず、地震時すべりが大きくならなかった一方で、高速度域では、本震発生前に相対的に大きな弾性歪が蓄積され、地震時に大きくすべった可能性がある。

また、すべり分布の端には P 波の顕著な高速度域が存在している。震源域における化学的不均質を認めた場合、そのすべり分布の端の顕著な高速度域には、苦鉄質岩が存在することが示唆されるが、そのような苦鉄質岩は、周囲の岩石より弾性定数や密度が相対的に大きく、強度が強いために、すべりの進展を妨げた可能性がある。

#### 4. 結論

本論文の結果と議論から、内陸地震の発生過程について以下のようなことが分かった。

内陸地震が多発する地震帯・歪集中帯では、その直下の下部地殻に weak zone が存在し、weak zone に変形が集中することで、直上でせん断応力・歪速度が局所的に増加し、内陸地震が多発しているという考えがあるが、本論文では実際に、地震帯直下の下部地殻に weak zone が存在している可能性が高いことを示した。また、weak zone の成因として、マントル上昇流がモホ面付近に到達していることによって下部地殻が高温になっていることや海洋プレートから脱水した水が下部地殻に侵入していることなどが考えられる。

大規模な内陸地震も地震帯・歪集中帯内で発生するケースが多く、それらも weak zone に変形が集中することで発生することが示唆される。その震源過程としては、クラック密度の高い領域で地震時すべりが小さくなる一方で、クラック密度の低い領域で地震時すべりが大きくなることを示唆される。さらに、周囲より密度の高い岩石は、地震時すべりの進展を妨げる可能性がある。

本論文は、「内陸地震の断層において、どのように応力が増加するのか?」、「内陸地震のすべり分布は、何によって決まるのか?」という問いに対し、一つの答えを提示できたものとする。