

脆性-塑性転移点付近の流体移動と地殻上部の強度低下機構： 内陸型地震の準備過程の解明に向けた地質学的アプローチ

Fluid migration and mechanisms for strength reduction at the brittle-ductile transition zone in the upper part of crust

竹下 徹^{1*}, 森 政藏²

Toru Takeshita^{1*}, Seizo Mori²

¹北海道大学大学院理学院, ²北海道大学大学院理学院

¹Hokkaido University, ²Hokkaido University

岩石の破壊実験より推定された破壊条件（摩擦すべり則, Byerlee's law）および石英多結晶の変形実験より推定された流動則（e.g. Gleason and Tullis, 1995）に基づき地殻上部の強度断面を描くと、脆性-塑性転移（以下B-D転移）点の深さは約12.5 km、差応力（強度）は約600 MPaとなる。ここで、間隙水圧は静水圧に等しく、歪速度は10-15/s、地温勾配は20°C/kmとされた。予想されるB-D転移点の深さは内陸地震の下限の深さ（15-20 km）と大きく変わらないが、この様に高い差応力は天然では観測されていない。したがって、天然では岩石の変形実験とは異なり、何らかの軟化機構（特に脆性強度を低下させる機構）が天然では作用したと推定される。いったん、地殻中の断層帯で強度の低下が起こると、変形はその部分に集中するので、最終的には地震を発生する様な脆弱な断層帯が作られて行く様に思われる。最近、Beaumont et al. (2004)はもともとインド大陸の地殻中部に存在したと考えられる高ヒマラヤの変成岩は、地殻上部の断層形成の摩擦係数が実験値の1/3程度になって初めて地殻上部に断層が形成され、上昇することを数値実験により示した。この研究でも、天然では何らかの機構で断層の強度が著しく下がっていることを示唆する。

筆者らは近年、三波川変成岩中の特定の層準に、B-D転移点付近の条件で形成された正断層が多数発達することを明らかにし、これらが三波川変成岩の地殻上部レベルへの上昇をもたらしたと考えている。これらの断層に沿っては石英ファイバー脈が析出しており、過剰水圧による剪断強度の低下が重要な断層の軟化機構であることがわかる。また、長期間かけて進行する断層の軟化機構としては、岩石の細粒化が極めて重要である。これまで、三波川変成岩中の様々な組成の岩石、泥質片岩、石英片岩、超塩基性岩起源の断層岩およびダメージゾーンを構成する岩石の微細構造を観察した結果、変形の基本はシェアバンドの形成とシェアバンドに伴う細粒化したゾーンの形成である。例えば、超塩基性岩起源の断層岩と考えられるアクチノライト片岩は、しばしば数ミクロン以下まで細粒化した定向配列したアクチノ閃石で構成されているが、不安定すべりによって形成されたと考えられる折りたたまれた微小褶曲が認められる。また、泥質片岩や石英片岩ではシェアバンドに沿ってフェンジャイト（白雲母）や緑泥石が沈殿しており、これらの雲母・粘土鉱物の底面すべりの摩擦係数が低い（0.3程度）ために破壊強度の低下が生じている可能性がある。最近開始された三重県飯高郡で中央構造線を貫いて得られたボーリングコア試料からも同様の変質鉱物の産状が観察される。すなわち、領家花崗岩類は、中央構造線に近づくにつれてマイロナイトからウルトラマイロナイトに変化し、さらにカタクラサイトに変化することから、変形温度の低下に伴う変形の集中が示唆される。カタクラサイト中では、大規模な交代作用（例えばWibberley, 1999）により細粒白雲母と緑泥石より主として構成されるフィロナイトが形成されており（Jefferies et al., 2006）、フィロナイト中の摩擦係数が低いために大規模な変位が進行したと考えられる。

上述の様な脆弱化した変質岩を作る作用として、流体の浸透に促進される変成反応が極めて重要である（化学反応軟化）。特に、緑泥石は10重量%以上の水を結晶中に含む鉱物であり、その形成には大量の流体移動が必要となる。さらに、例えば石英片岩中の白雲母の成長やアルバイトの白雲母化（フィロナイトの形成）において、大量のKが外界から流入する必要があるほか、他の反応においてはMg, Fe, Caが大量に移動している（交代作用）。これらの流体を介した物質移動は反応・拡散の速度（カインティクス）に支配されているので、それらの素過程を明らかにして初めて流体移動のモデルの構築が可能となる。最終的に地球物理観測により近年明らかとなって来た地殻中の流体の分布等を説明するには、天然のさく削された地質時代の断層帯の物質科学的解析が極めて重要となる。

キーワード:流体移動,脆性-塑性転移帯,シェアバンド,軟化機構,摩擦係数,岩石の細粒化

Keywords: fluid migration, brittle-ductile transition zone, shear bands, softening mechanism, coefficient of friction, grain size reduction in rocks