

# 地震発生層における地震素過程の解明

増田 幸治<sup>1)</sup>・佐藤 隆司<sup>1)</sup>・重松 紀生<sup>1)</sup>・高橋 美紀<sup>1)</sup>・上原 真一<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

活断層・地震研究センターでは、内陸地震の予測・評価手法を高度化するために、これまでの地質学的調査主体の手法に加え、地球物理学的な研究を融合させることにより物理的合理性のある長期予測を目指す方針である。これら手法の融合のためのプラットフォームとして「物理モデル」を構築する(岡村, 2009; 桑原, 2009)。そして、物理モデルを基に、コンピュータ上で数値シミュレーションを実施することで地震発生の予測を行う。したがって、今後の地震発生の時期や規模を予測するシミュレーターの高精度化のためには、活断層の活動履歴解明に加えて、地震発生プロセスを再現するための基礎となる物理モデルの信頼性を向上させる必要がある。活断層・地震研究センター地震素過程研究チームでは、物理モデルの信頼性向上を目指し、地殻の力学的な性質や物性を明らかにするために、地震発生層における断層運動の物理法則解明に取り組む。

## 2. 地震素過程の解明

内陸部に発生する大地震の震源は深さ約10-15 kmの地下深部にあるという特徴がある。地震時は、断層深部で始まった断層のすべりや岩石の破壊が地表にまで達して、地震断層として地表に現れる。実際に地震が発生し、破壊やすべりが始まる地下深部では、圧力や温度などの環境条件は地表とは異なる高温高压状態である。そこでは岩石の変形様式も地表で観察されるものとは異なっている。内陸大地震の震源深さ付近は、岩石の変形様式が脆性的から塑性的挙動に変わっていく遷移領域となっている(例えば、藤本, 2004)。したがって、断層深部で実際に起こ

っている破壊やすべり現象を解明することが地震発生モデルの高度化にとっては重要な鍵となる。活断層・地震研究センター地震素過程研究チームでは、地質学および地球物理学的に、より確からしい地震発生モデルの構築に向けて、大地震が発生する地下深部における断層の挙動を明らかにし、地震発生の素過程を解明することを目指している。そのために、まず、過去に地下深部において現在地表に露出している岩石を地質学的に調べて、断層深部での岩石の変形機構を明らかにする。さらに、実験室で高温高压の地下深部環境を再現した変形実験を行うことにより、地質学的には明らかにできない断層の力学的性質などの物理的性質を解明する(増田, 2004; 増田ほか, 2004)。これらの結果は、コンピュータ上で地震発生を再現する際に重要なパラメータとして利用され、シミュレーションによる地震発生予測精度の向上に貢献するものと期待される。

## 3. 深部断層岩の構造地質学的研究

地震発生層に相当する地下深部での岩石の変形様式については、主に、過去地下深部において現在地表に露出している岩石を調査することで研究されてきた。そのような地域は国内に何か所知られており、その代表的な地域として福島県畑川破碎帯について、Shigematsu *et al.* (2009)は、地下深部での変形が局所化している様子や、地震に代表される高速のすべり現象が起きたことの証拠となるシュードタキライトの存在を明らかにした(写真1)。このような断層深部延長における変形の局所化と、脆性-塑性遷移境界領域での応力集中は内陸大地震の発生機構の有力なモデルと考えられている(例えば、飯尾, 2009)。

1) 産総研 活断層・地震研究センター

キーワード: 地震発生予測, 断層深部, 高温高压実験, 脆性-塑性遷移, 断層岩, 蛇紋岩

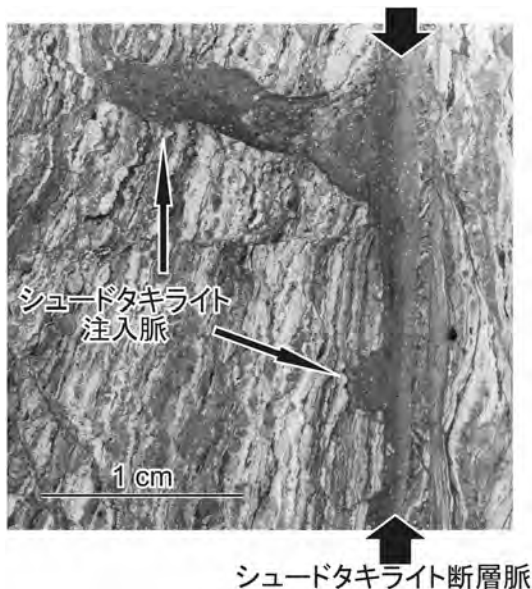


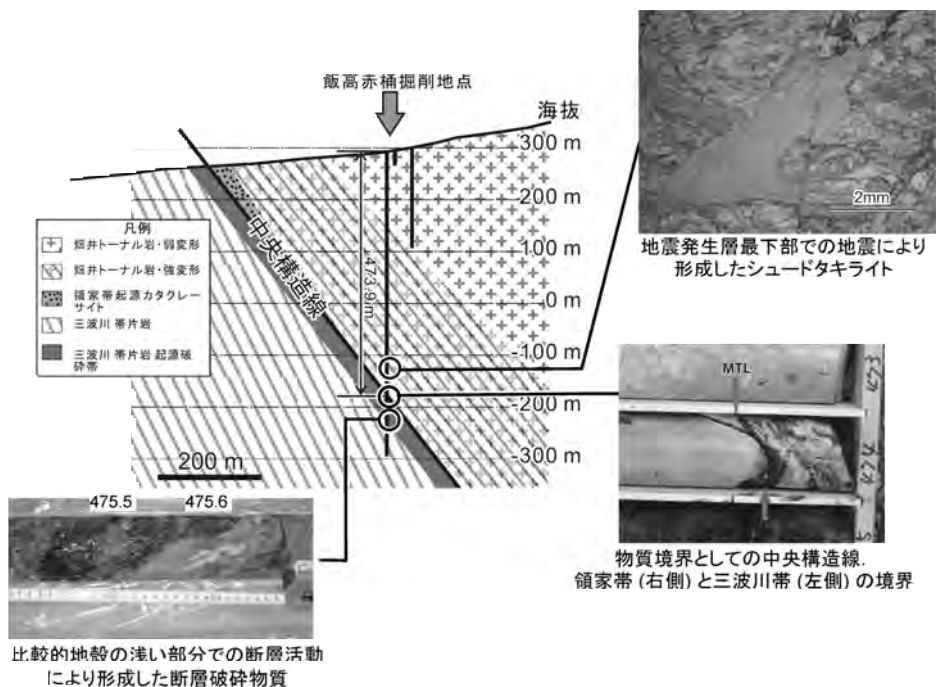
写真1 過去の断層深部において、摩擦溶融を起こした岩石(シュードタキライト)。構造地質学的調査によって、過去に地下深部で何が起こったかの情報を得る。

所が狭い範囲で局所的に分布し、さらに温度300℃付近で塑性流動した場所も一部線状に分布していることがわかった。これらは断層深部延長では塑性変形が局所化している証拠の一つと考えられる。また、産総研では、東南海・南海地震予測のための地震地下水等観測施設の一つを、紀伊半島の中央構造線付近に建設した。この際に、掘削深度473.9mで中央構造線を貫通している、掘削深度600mまでのボーリングコア試料が得られている。中央構造線の上盤側は領家帯花崗岩類起源断層岩、下盤側は三波川帯変成岩起源の断層岩から構成されている。第1図に示すように、このボーリングコアは温度300℃以上で形成されたマイロナイトから100℃付近で形成された断層ガウジまで、内陸地震発生領域の最深部から地表付近までの情報を含んでいる。今後、断層深部における岩石の変形様式や、地下深部から地表に至る断層の多様な挙動に関する情報が得られると期待される(重松ほか, 2009)。

今後は、同様な構造が現在地表で見られる地域である紀伊半島の中央構造線沿いの地質調査を実施する。この地域には、温度400℃付近で塑性流動した場

#### 4. 高温高圧実験による物理学的研究

地震発生層における岩石の変形や摩擦現象を調べるためには、実験室内でその場の環境に相当する温度・圧力を再現して、その環境条件の中で岩石の変



第1図 中央構造線を貫くボーリングコア試料。内陸地震発生領域の地下深部から地表付近までの情報を含んでいる。



写真2 ガス圧式高温高压変形実験装置。地下深部で起こっている岩石の変形挙動を再現し、断層運動の物理法則を得る。

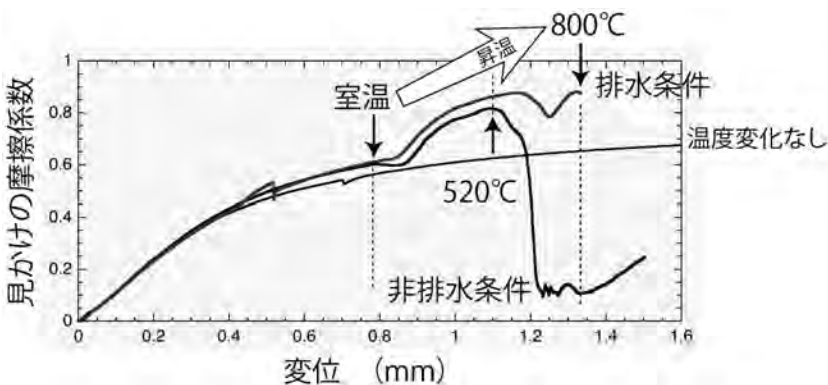
形やすべりを起こさせることのできる性能と機能をもった実験設備が必要になる。活断層・地震研究センターではそのための設備としてガス圧式高温高压変形実験装置を所有している(写真2)。この装置は、地下約8kmに相当する最高圧力200MPa(約2,000気圧に相当)を再現できる。また地下深部での変形は非常にゆっくり進行し、その進行速度を実験室で再現することは困難な場合がある。この装置によって、実際の断層深部環境より高温状態を実現し、変形現象の進行速度を上げることで、断層深部のゆっくりとした変形を観察できる。高压下でかつ高温状態を実現するために、圧力媒体に不活性ガスであるアルゴンガスを使用したことによって最高温度800℃までの環境を再現できる。さらに間隙流体圧を独立に制御できるようになっている。

我々は、水の存在や相変化による強度変化などで、地表では見られない性質が断層運動に影響を与えて

いることを示してきた。第2図に、含水鉱物の脱水反応によって断層内に生じる間隙水圧が、断層摩擦強度の急激な低下を引き起こすことを明らかにした高温高压実験結果の例を示す。この実験は、蛇紋岩を試料として用い、封圧80MPaの下で断層運動を起させながら、温度を上昇させ、周囲の透水条件を排水条件、非排水条件にした場合の摩擦係数の変化を調べたものである。断層変位量が0.8mmから1.3mmまでの間で、温度を室温から800℃まで一定の昇温率で上昇させた。蛇紋岩の脱水が始まる520℃以上の温度で、非排水条件下の摩擦係数が大きく減少した。この減少量から最終的に推定される間隙水圧は封圧の約9割に相当する70MPaであった。このことから断層運動中に断層内で起こる脱水反応が断層の強度変化に大きな影響を与えていることがわかった(例えば、Takahashi *et al.*, 2009)。

今後は、比較的低温でも脆性-塑性遷移領域の挙動が出現するとされている蛇紋岩を用いて、その高温高压下での摩擦挙動を明らかにし、引き続き、脆性-塑性遷移領域における断層運動の物理法則解明に取り組む予定である。蛇紋岩は沈み込み帯に存在する岩石としても知られており、海溝型地震の発生メカニズムの解明にも有用な情報が得られると期待できる。

また、断層周辺の応力状態と地震切迫度評価の高度化にも取り組む。写真3に、高速・大容量・多チャンネルのAE(アコースティック・エミッション、岩石中に発生する微小破壊に伴って放出される弾性波)波形記録処理システムと実験装置の試料部を示す。このシステムを用いて、断層面形成過程や最終破壊に至るAE活動変化のモデル化が可能になった(本特集号口絵3:佐藤・雷)。今後は、応力状態を制御した条



第2図  
含水鉱物の脱水反応による摩擦強度の変化。断層運動中に起こる鉱物の脱水反応が断層摩擦強度に大きな影響を与えている。

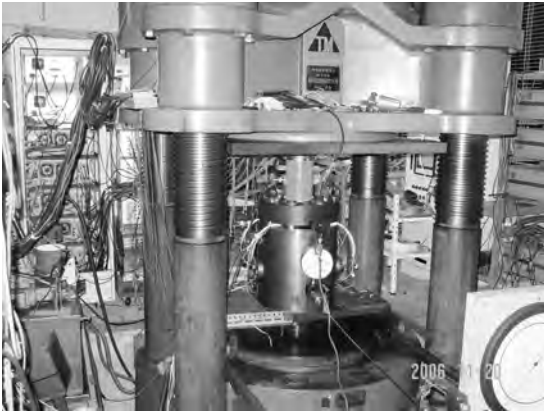


写真3 AE計測処理システムと高圧岩石変形実験装置。断層面形成過程や最終破壊に至る際の地震活動変化のモデル化が可能になった。

件下で岩石の変形破壊実験を行うことによって、断層周辺の応力状態と地震発生の関連性のモデル化を行い、地震切迫度の指標の提案を目指す。

## 5. 地質学と地球物理学の融合

活断層・地震研究センター地震素過程研究チームでは、構造地質学的な調査から地球物理学的な実験研究までの一連の融合的研究を通して、地震発生層における物理化学プロセスの解明を行う。今後は、シミュレーション研究とも連携しながら、地震発生域に相当する深度における、変形プロセスを解明し、脆性(主に摩擦すべり)のみではなく塑性法則も加味した構成則を提案することを目指す。

## 参考文献

- 飯尾能久(2009):内陸地震はなぜ起こるのか?, 近未来社.
- 藤本光一郎(2004):断層深部の変形状態を直接見る, 産総研シリーズ「活断層と地震-過去から学び, 将来を予測する-」, 丸善, 135-145.
- 桑原保人(2009):内陸地震の物理モデルと予測, 地質ニュース, 663(本特集号), 14-18.
- 増田幸治(2004):実験室で探る断層深部のすべりと変形, 産総研シリーズ「活断層と地震-過去から学び, 将来を予測する-」, 丸善, 146-154.
- 増田幸治・新井崇史・高橋美紀・重松紀生(2004):高温高压実験による地震発生の素過程の解明, 地質ニュース, 597, 21-25.
- 岡村行信(2009):地形・地質学と地球物理学の融合から目指す地震研究, 地質ニュース, 663(本特集号), 6-10.
- 佐藤隆司・雷 興林(2009):実験室から地震に迫る, 地質ニュース, 663(本特集号), 口絵3.
- 重松紀生・小泉尚嗣・藤本光一郎・古谷直人・田中伸明・竹下徹・森 宏・Simon Wallis・木村希生(2009):中央構造線断層帯掘削とコアによる断層帯内部構造解析, 地質ニュース, 662, 特集:東南海・南海地震予測のための地下水等総合観測点整備に関連する調査研究報告会, 16-22.
- Shigematsu, N., Fujimoto, K., Ohtani, T., Shbazaki, B., Tomita, T., Tanaka, H. and Miyashita, Y. (2009): Localisation of plastic flow in the mid-crust along a crustal-scale fault: Insight from the Hatagawa Fault Zone, NE Japan, J.STRUCT.GEOL. 31, 601-614.
- Takahashi, M., Mizoguchi, K. and K. Masuda (2009): Potential of phyllosilicate dehydration and dehydroxylation reactions to trigger earthquakes, J.GEOPHYS.RES, 114, B02207, doi: 10.1029/2008JB005630.

MASUDA Koji, SATOH Takashi, SHIGEMATSU Norio, TAKAHASHI Miki and UEHARA Shin-ichi (2009): Physical and Chemical Processes of Earthquakes in the Deep Hypocentral Regions.

<受付:2009年9月1日>