

Contents

● 地震発生機構における流体と物理化学過程の役割 … 1

● 外部委員会活動報告
2012年1月 … 4

地震発生機構における流体と物理化学過程の役割

増田幸治（地震素過程研究チーム）

はじめに

水などの地殻内流体の存在や移動は、地震発生過程のさまざまな段階に大きな影響をおよぼしています。流体（例えば水）が、地殻の強度を急激に変化させ、それが地震の発生につながると考えられています。また、地下深部での水の流れや水圧の変化が、地震活動を誘発したり、大地震の引き金になったりしていることなども示唆されています。地震発生機構において、流体が関与する物理化学過程の役割を室内実験によって明らかにしようとする研究を行っています。

地震発生につながる地殻内プロセスとしては、地殻内の歪の蓄積と地殻構成物質の物性、とくに強度の時間変化を考える必要があります。歪や強度の局所的変化は地震の発生に大きく影響します。地殻の歪変化は観測できますが歪の絶対値は分かりません。また、歪や強度の局所的変化や深部での変化を観測することも困難です。地殻の強度は、地殻内の流体によって大きく影響を受けるし、流体の移動や化学反応によって時間的な変化もおこります。このような地震発生につながるプロセスに重要な役割を担うすべてのパラメータを、観測によって正確に得ることは極めて困難です。

室内における実験研究では、自然界で起こっている現象の基礎的なメカニズムを説明するモデルの構築をおこなっています。室内での岩石変形・破壊実験では、岩石内部のクラック分布などの不均質性、岩石の応力状態、流体の圧力成分などといった諸条件を設定できます。また、岩石内部を移動する流体、発生する微小破壊の分布などの時間変化を精密にモニターすることもできます。岩石の変形（歪）の絶対値と時間変化の精密測定も可能です。さらに実験前後の試料を分析することにより、水と岩石の化学反応の結果を詳しく調べることもできます。岩石の物性に及ぼす流体の影響を系統的に調べることが可能です。このような利点があるので、室内実験は岩石の変形・破壊過程における流体の役割の本質的な物理的・化学的メカニズムを調べるのに適した研究方法といえます。

岩石の内部には多数のクラックや空隙が含まれていて、水をはじめとする流体が移動する通路であったり、流体が存在する空間となったりしています。岩石の変形や破壊強度に対する空隙中の水の影響には、物理的な効果と化学的な効果の2つがあります。物理的な効果とは、クラック内や空隙に存在する水により間隙水圧が上昇し、その結果として岩石に加わっている封圧や応力を減少させたのと同じ効果をもたらすというもので、有効圧の概念として知られています。化学的な効果は、水



が存在することによって岩石との間に応力腐食作用に代表される化学反応がおこり、その結果として岩石の強度が時間に依存するというものです。

ここでは、地震発生の素過程研究のなかで、流体が地震発生に関与するメカニズムとして、物理的効果と化学的効果を調べた例をそれぞれ紹介します。

2. 物理的効果

応力を加えた岩石試料に水を浸透させる実験を行い、空隙圧の変化によって誘発された微小地震活動について調べた例を紹介します。花崗岩試料に封圧(40MPa)と破壊強度の約70%の差応力(410MPa)を加え、その後は実験終了まで応力状態を一定に保ちました。差応力を加えたことによって発生した微小破壊(AE)活動が静穏化してから、試料下端面から一定の圧力(17MPa)で水を注入する実験を行いました。試料は水の注入を開始して約2時間後から内部の微小破壊活動が再び始まり、さらにその約3時間後に微小破壊活動が急速に活発化したあと試料全体が破断しました(図1)。

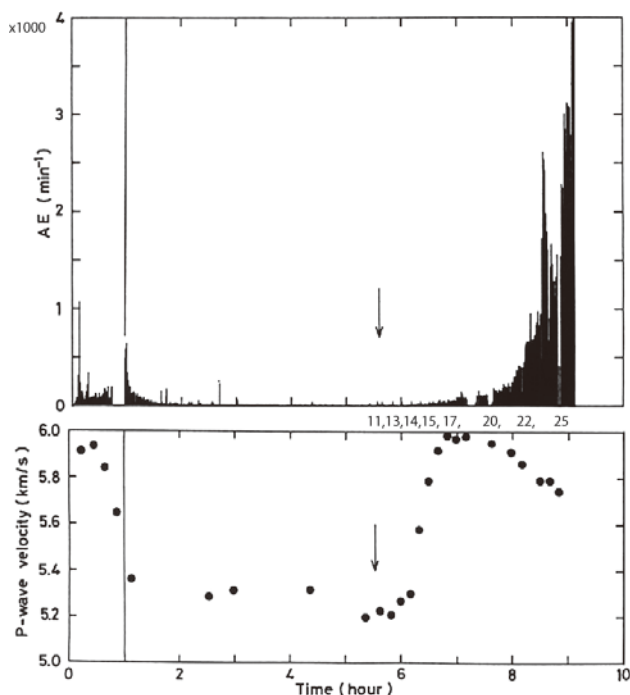


図1 微小破壊(AE)の発生数とP波速度の時間変化。横軸は試料に封圧(試料全体にかかる一様な圧力)下で、差応力を加え始めてからの経過時間。約1時間後からは試料に加える応力を一定値に保った。約5.5時間後(矢印で示した時間)から、試料に水を浸透させた。(上図)1分あたりのAE発生数。(下図)P波速度変化。

図2の、上の図は岩石試料の断面にそったP波速度変化の分布図(トモグラフィー図)です。下の図は同じ期間内に岩石内部で発生した微小破壊の震源分布です。水は岩石試料の下から上方に移動していきます。上図では色が濃いほどP波速度が速くなっていることを表していて、これは岩石内部の水の移動を反映しています。水は最初一様に上方に移動していきますが、試料中央では左側の方がP波速度変化が大きく(速く)なっています。これは左側に選択的に水が浸入していったことを表しています。対応する下図をみると試料の左側の方に微小破壊が多く発生していて、こちら側に破壊による空隙がより多く発生していたことがわかります。水は空隙の多い方に選択的に侵入していきまし。水が浸入するとその部分は局所的に空隙内部の水圧が上昇します。その結果有効圧が下がり岩石強度が局所的に下がります。そしてさらにその部分で破壊活動が活発になるという、「正のフィードバック」作用が働き、破壊がさらに進行します。例えばこのように、水の移動と微小破壊の発生についての相関や誘発地震のメカニズムのモデルを得ることができます。

3. 化学的効果

断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られています。地震発生サイクルは数百年から千年という長期間であるので、断層強度の長期的変化の全容は地球物理学的手法によるモニタリングでは直接観測することができません。そこで、断層摩擦強度の長期的弱化メカニズムの本質は、断層面が真に接触しているアスペリティ先端部での、ゆっくりしたクラック進展によって引き起こされるミクロな破壊であるというモデルを提唱し、それを検証する実験を行いました。このモデルは、断層強度の長期的弱化は水の存在下で進行する化学反応が関係していることを示唆しています。したがって、このメカニズムが有効に働いているのなら、断層強度の長期的弱化に対する水の影響が実験室で観測されるはずで。

自然界でゆっくり進行する現象を観察可能な速度で再現するために、実際の環境より高温状態で断層の摩擦強度に対する水の影響を調べました。化学反応の速度は温度の関数なので、温度を上げることによって現象を加速できるからです。円柱形に整形した岩石試料の圧縮破壊実験を行いました。試料には福島県畑川破砕帯より採取したマイロナイトを用い、その際、円柱試料の軸方向が元のマイロナ

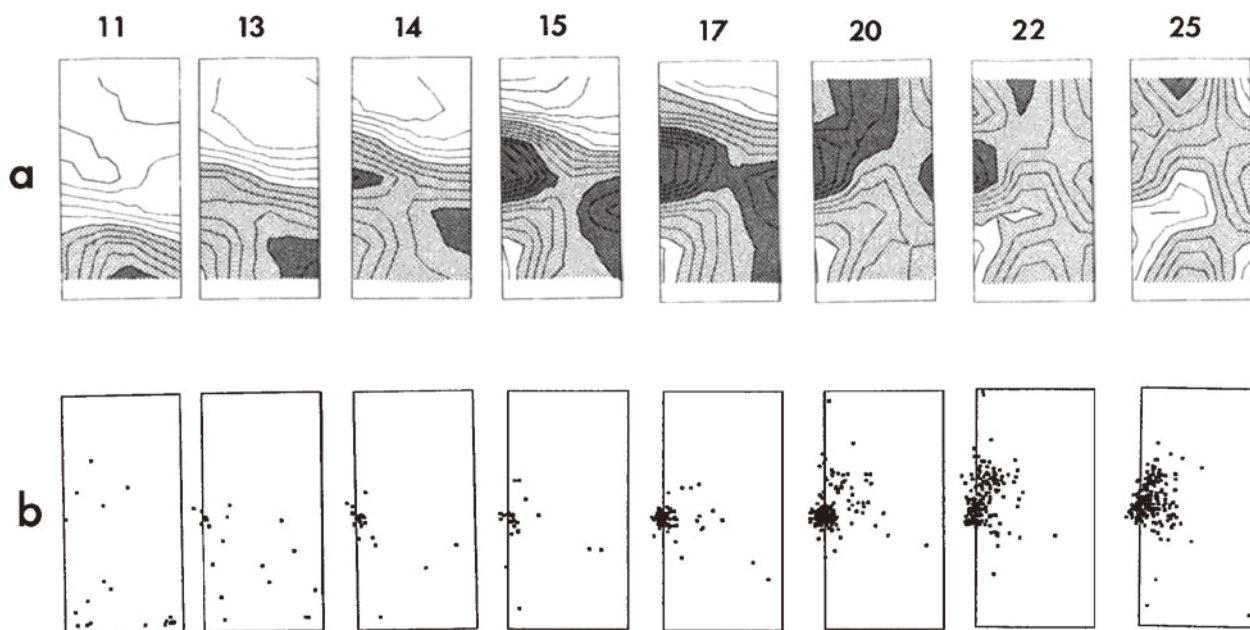


図2 図1下図に示した各番号に対応する時間でのP波速度分布とAE震源分布図。(a) P波速度変化の分布図、水の浸透開始時からの速度増加。等高線の間隔は1%の速度増加分を表す。(b) 同じ断面内で発生した微小破壊(AE)の震源分布。

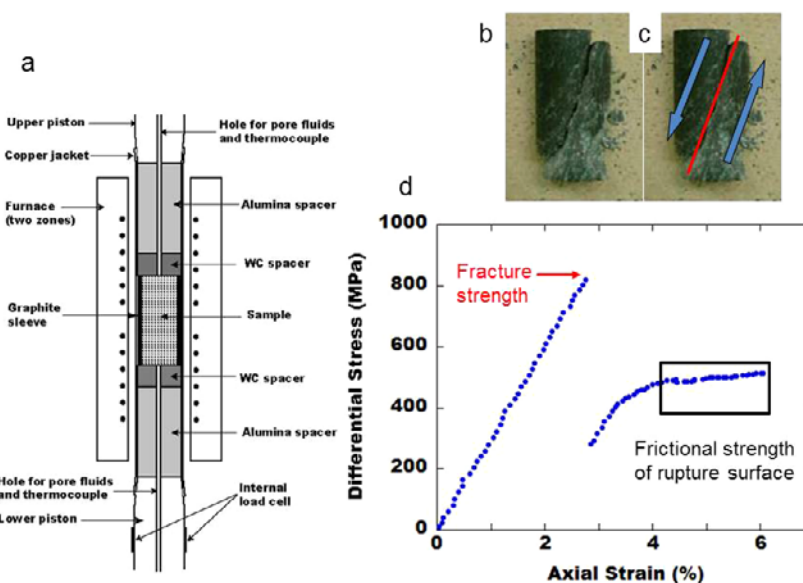


図3 高温高圧下における断層面の摩擦強度測定実験。(a) 実験装置内に試料をセットしたところ。(b) 実験後の試料。試料の長軸と試料の構造面が30度になるように整形した。(c) 形成された破断面(赤い線)の断層運動に伴う摩擦強度を測定した。(d) 応力-歪曲線の例。

イトブロックの面構造と30度になるように切り出しました。試料に圧縮応力を加えると面構造に沿った方向に破断面ができます。そのまま試料に圧縮応力を加え続けることによって、形成された破断面を滑らせ、摩擦強度を測定しました(図3)。

その結果、水のない環境では摩擦強度は温度が上昇してもほとんど変わらないのに対して、水の存在下では摩擦強度は温度の上昇に伴って低下することがわかりました。間隙水圧の上昇で強度低下を説明する有効封圧の法則で知られているような、物理

メカニズムとは別のメカニズム（化学的効果）によると考えられる強度低下を示すデータを得ました。

図4は岩石の破壊面の摩擦が温度によってどうかかわるかを示したものです。水が存在する環境では、断層の摩擦強度が温度上昇に伴って低下することがわかりました。温度を上昇させるというのは化学反応の速度を加速するということに対応していますので、温度が高いほど長期的な現象を観察することによってに相当します。断層の摩擦強度が長期的に低下していくメカニズムは、水が関与する化学反応に関係していることがわかりました。これまで、水が断層強度を低下させるメカニズムは高い間隙水圧に関係するとして多くのモデルが作られてきましたが、水は圧力が高くなくてもその存在によって化学反応プロセスを通して断層の強度変化に関与していることが示唆されました。

4. まとめ

本論では、地震発生に関して流体が関与する物理化学過程の役割を明らかにしようとする室内実験研究の例を紹介しました。実験室内での岩石実験では、このように本質的なメカニズムを抽出して検証し、基礎的現象のモデル化を行っています。それらの結果をもとに、地震発生予測シミュレーション研究に、地質学的・物理学的根拠をもったパラメータを提供するなどを通して、信頼性を与える役割をはたしています。

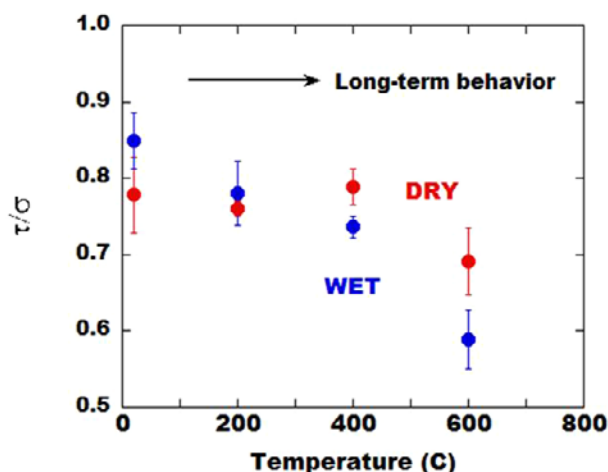


図4 摩擦（縦軸）と温度の関係。温度が高いほど長期的な現象を観察していることに相当する。摩擦強度は、水が存在する場合、温度の上昇にともなって低下する。

外部委員会等 活動報告（2012年1月）

2012年1月11日

地震調査委員会（岡村出席 / 文科省）

平成23年12月の地震活動について他

2012年1月17日

南海トラフ巨大地震モデル検討会（岡村出席 / 内閣府）

南海トラフ巨大地震モデルに基づいた地震動、津波モデルの構築

2012年1月24日

地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部
会第12回活断層分科会（吉岡出席 / 東京）

2012年1月30日

地震・津波関連指針等検討小委員会（岡村出席 / 原子力安全委員会）

指針の改訂について

2012年1月30日

南海トラフ巨大地震モデル検討会（岡村出席 / 内閣府）

南海トラフの巨大地震モデルにおける地震動及び津波の計算方針について