

## (1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

## (2) 研究課題（または観測項目）名：

流体の寄与に注目した地震断層すべり物理モデルの高度化

## (3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

## (4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

## (5) 総合的研究との関連：

## (6) 平成30年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

**課題番号：1204，課題名：地震断層すべり物理モデルの構築**

断層の成長の特徴を抽出し、大きな断層も小さな断層も3階層程度の入れ子構造を持つことを示した。また、地震発生域近傍の比抵抗構造を調べ、いずれも地震はやや高比抵抗の領域で発生するものの、その直下に低比抵抗の領域が存在していることが多いことを示した。

2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した山形-福島県境付近の群発地震活動を丹念に調べ、カルデラの周りで地震波反射面が分布していることを明らかにした。これはカルデラ壁に沿って流体が存在している可能性を示す。また、この群発地震活動は深部から浅部に向かってマイグレーションしており、活動の様々なパラメータが活動開始から50日くらいまで異常な値を取り、それ以降は普通の値に落ち着くことを明らかにした。このことは、群発地震活動の初期の活動は間隙圧増加による強度低下によって生じていることを強く示唆する。

実験に基づき、塩水の比誘電率を定式化し、これにより、石英等が析出しやすい条件を明らかにすることができた。実際に実験により、石英の溶解や析出によるシールを再現することに成功した。また、下部地殻の条件下で、水があると強度が下がって変形が進み、さらに水が入って変形しやすくなることを明らかにした。さらに、沈み込んだスラブから島弧地殻へと水が供給される過程における、前弧側マントルウェッジ内での水の存在形態の候補も示した。

以上のように、流体と地震の関係が様々な観点から検証されたことにより、少なくとも群発地震は流体の急激な上昇によって発生した可能性が高いことが明らかになり、また、下部地殻の剪断帯に水が入り込むと、ますます変形が進みさらに水が入り込むという正のフィードバックが働くことから、水が存在すると強度が低下するのみならず、応力・歪が集中していくことも明らかになった。これにより、断層スケールでも、比抵抗分布等から水の存在範囲を調べることにより、地震の発生しやすい場所をあらかじめ特定できる可能性があり、それによって災害軽減に貢献できる可能性があることがわかった。

(7) 本課題の5か年の到達目標：

流体が深部に局所的に豊富に存在していると、そこで歪速度が上昇しやすくなり、その浅部に応力・歪が集中しやすくなると考えられる。また、断層中に流体があれば、間隙圧が上昇して強度が低下すると考えられる。このように流体は地震発生に大きくかかわっていると考えられていたが、多くは定性的な理解にとどまり、定量的な理解が進んだのはごく最近のことである。このような定量的な検討から、地震発生域では差応力が小さく、断層の強度がこれまで考えられていた値の1/10程度と極めて低いことが次第に明らかになって来ており、その原因としてはやはり断層の中の流体の可能性が一番高いと考えられている。しかし、その流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態はまだ必ずしもよくわかっていない。このような問題意識のもと、下記のサブテーマを実施し、これらを統合することにより、特に流体の寄与に注目して地震断層すべり物理モデルの高度化を目指す。

**1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明**

地震断層すべりの理解の上で応力と強度を正しく把握することが重要である。応力については主応力の方向と応力比の情報に加えて、大地震やかぶり圧の影響を正しく評価することにより、差応力の大きさについても情報が得られつつある。今後、高精度・多量の震源分布と発震機構解を利用し、小規模な地形や中規模地震が応力場に与える影響から、差応力の大きさの分布を高精度で推定することを目指す。さらに地震の振幅情報も用いて、発震機構解と応力場と観測点補正值を同時に推定する新しい手法を開発する。また、大地震による構造の時空間変化を推定し、それと地震活動や応力の時空間変化と比較することにより、地震活動に対する流体の寄与についてより詳細に明らかにする。

**2) 摩擦強度の環境依存性の解明**

速度・状態依存摩擦則の微視的過程は真実接触点における圧力溶解クリープであり、その振る舞いは雰囲気中の水蒸気量に依存することが最近の実験で示されている。一方、摩擦すべりに伴って局所的な脆性破壊(AE)が発生することや、脆性破壊強度が雰囲気中の水蒸気量に依存することは知られているが、これらが複合して摩擦の振る舞いにどのような影響を与えているのかは調べられていない。本サブテーマでは水蒸気量を制御した雰囲気中で摩擦実験を行い、摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることで、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。この成果は微小地震活動モニタリングに基づくプレート境界の摩擦特性の推定や固着状態の評価にも貢献し得る。

**3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明**

地殻流体が地震の発生に強く関与していることが指摘されているが、地震に関与する地殻流体の物理化学的性質および動的挙動についての知識は希薄である。特に地震発生帯やその直下での温度・圧力条件での地殻流体の基本的性質についての理解が進んでおらず、状態方程式、化学反応性、流体分子構造、輸送現象の解析などが未整備の状態である。本サブテーマでは、地殻流体の熱物理、化学反応、分子構造、輸送現象、破壊現象間の関わりについて先端設備を用いた室内実験や数値シミュレーションにより明らかにするとともに、地上に露出した化石地震発生帯の野外観察などの情報を融合させて、地震発生における地殻流体の役割と振る舞いについての検討を進める。

**4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明**

地球物理学的に観測される地震波速度と電気伝導度から、岩石の粒間に存在する地殻流体の存在量・組成・存在形態を見積るには変数が過剰であり、岩石相など何らかの仮定を置く必要がある。もし流体の化学組成と間隙流体の存在形態・電気比抵抗との間の関係式を新たに与えることができれば、制約条件が増え、流体量などのより正確な推定が可能となる。地殻流体は、有馬型熱水に代表されるようにCO<sub>2</sub>とNaClの濃度が高いと考えられているが、この両成分は、流体の二面角に対して相反する効果を与え、両者が共存した場合の二面角がどのような挙動を示すかについては殆ど知られていない。そこで、H<sub>2</sub>O,CO<sub>2</sub>,NaCl三成分系の流体と鉱物間の二面角を高温高压実験によって決定する。

**5) 下部地殻のレオロジーにおける流体(水・メルト)の効果の解明**

地震波トモグラフィや電磁気探査から断層深部延長の下部地殻に流体(水や部分溶融体)の存在が示唆され、流体の存在による歪局所化が断層深部への局所的ローディングを引き起こす可能性が指摘されている。つまり、流体の存在は、断層の強度を低下させるのみならず、断層のローディング機構にも深くかかわっている可能性がある。そこで、下部地殻条件における流体の効果を明らかにするために、実験室において下部地殻の温度圧力を発生することのできる試験機を用いて、下部地殻岩石のレオロジーに及ぼす流体の効果を明らかにする。

(8) 本課題の5か年計画の概要：

●1年目（令和元年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

2011年東北地方太平洋沖地震後の応力場の時空間変化を追跡し、歪速度場の時空間変化と比較することにより、応力の時空間変化の原因を探る。中規模地震の破壊過程を詳細に調べることににより、強度の不均質性と破壊の不均質性の関係を検討する。ニュージーランド等、海外の応力場と日本の応力場の違いと共通性を検討する。応力場を推定する新たな手法の開発に着手する。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

試料室を外気と隔離できるようにしたロータリー式低速せん断試験機（最大すべり速度は約0.8 mm/s、法線応力は15MPaまで）で摩擦すべり実験を行い、水蒸気量が摩擦強度や摩擦のパラメータ、AE活動に及ぼす影響を調べる。現状では、試料室の雰囲気制御は乾燥状態（湿度がほぼ0%）、飽和状態（湿度がほぼ100%）、室内状態の3通りに限られている。初年度は実験を行いつつ、雰囲気制御範囲を広げるよう試験機の改良を行う。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

超臨界地殻流体の300-500℃、50-1000 MPaでの状態方程式と、その条件での岩石と流体の反応についての状態方程式や熱力学データが全く不足している。特に、地殻流体の平衡計算をする上で重要となる電荷のある溶存種について熱力学データについて、既存のデータには存在しない超臨界、気相領域まで経験的に外挿することを試み、実験によって検証する。

鉱物界面での純水の構造化を調べた実験装置と技術を用いて、 $H_2O-NaCl-CO_2$ の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を調べる。さらに、既に開発している超臨界条件における真三軸応力発生ならびに水圧破碎装置を用いて、300-500℃、50-150 MPa条件での岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展ならびに地殻流体透水性に関する流体流動実験に着手する。また、三波川変成帯、東北地方の花崗岩類と接触変成岩における流体通路（鉱物充填脈）の分布、特性を評価し、沈み込み帯と地殻における流体の物理化学的特性とその動的挙動を調べる。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

鉱物の界面エネルギー異方性が比較的小さく、いわゆる組織平衡の状態を想定しやすい、最上部マントルを構成する主要鉱物である橄欖石の、 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $NaCl$ 三成分系流体との二面角を、ピストンシリンダー装置を用いて1-4 GPa、900-1200℃の条件で実験を行う（高圧側では $MgCO_3$ が共存する条件となる）。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

下部地殻を構成する鉱物粉末を焼結し人工多結晶体を焼結する。さらに細粒変成岩試料を出発試料として、下部地殻の温度・圧力を発生することのできる変形試験機を用いてこれらの多結晶体の変形実験を行い、下部地殻の変形における流体の効果調べる。

●2-4年目（令和2-4年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

応力場の推定手法の開発を継続し、実施しやすい地域から随時応力場の推定を行っていく。合わせて誤差の評価も行うことにより、差応力の推定範囲を正しく見積もる。顕著な応力変化が見られた地域において地震波干渉法等により構造の時空間変化を推定し、地殻流体と地震発生の関係を明らかにする。また、海外も含めた様々な地域での応力推定結果を比較し、地殻流体の観点から、応力場や強度の地域性の解釈を行う。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

改良された試験機を用いて、より多様な雰囲気での摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることにより、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

H31年度に開発された計算コードを用いて、既存の $H_2O-NaCl-CO_2$ 系流体中の石英の溶解実験データから、同系流体の誘電率を見積もる。鉱物界面での流体の状態・挙動の実験を継続し、 $H_2O-NaCl-CO_2$ の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を明らかにする。流体流動実験を継続し、岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展と地殻流体透水性を明らかにする。さらに、領家変成帯や三波川変成帯における流体通路の調査を継続し、母岩の温度構造と流体の物理化学的特性との関係を明らかにする。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

2年目は橄欖石の実験を継続する。二面角は、鉱物表面の分極度と、流体の分子スケール構造によっ

て決定され、後者の方が前者に比べて、温度圧力条件によって大きく変化すると考えられるため、橄欖石の実験結果を解析することで、他の鉱物と三成分系流体との間の二面角についても、流体組成による変化傾向が推定できる。そこで3年目は石英・輝石など地殻を構成する主要構成鉱物と三成分系地殻流体との二面角についての見積りを行う。地殻流体の電気比抵抗と化学組成の関係については、近年、市來らによるモデル化が進んでいるので、以上によって求めた地殻流体組成と流体形状の関係式と併せることで、宮城県北部地域など地震波トモグラフィやMT法の同時観測が行われている地域について、地殻流体量の再見積りを4年目に行う。

#### 5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

人工および天然の変成岩類多結晶体の変形実験を継続し、下部地殻の変形における流体の効果を明らかにする。特に岩石の組成や流体量、実験の温度・圧力・ひずみ速度を制御することで、岩石の強度に対する反応（含水反応）などの効果を定量的に評価し、下部地殻レオロジーに及ぼす流体（水・メルト）の効果を定量的に評価する。

#### ●5年目（令和5年度）

各サブテーマにおいて最終的な解析を行い、それらを取りまとめて、流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態を明らかにすることにより、流体の寄与を考慮した新たな地震断層すべり物理モデルを提案する。

#### (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中村美千彦・武藤潤・矢部康男・岡田知己・吉田圭佑・高木涼太・松澤暢

他機関との共同研究の有無：有

土屋範芳（東北大学環境科学研究科先進社会環境学専攻）、岡本敦（東北大学環境科学研究科）、宇野正起（東北大学環境科学研究科）、行竹洋平（東京大学地震研究所）

#### (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学 大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

#### (11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松澤 暢

所属：東北大学 大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター