

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

実験と自然観察が明らかにするミクロとマクロの地震の関与する地殻流体の実態

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(4) 地震発生・火山噴火素過程

ア．岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-1) 地震準備過程

ア．アスペリティの実体

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-1) 地震発生先行過程

イ．先行現象の発生機構の解明

(4) 地震発生・火山噴火素過程

イ．地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

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。特に地震発生帯の温度・圧力条件(300-500℃, 1kb-10kb)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。地殻流体の基礎情報を充実させるとともに、これらの基礎知識を地震発生メカニズムの解明に結びつける必要がある。

本研究課題では、地殻流体の熱物理、化学反応、分子構造、輸送現象、破壊現象との関わりを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(岩石-水相互作用)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。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、地殻流体状態方程式を構成する基本パラメータについて、地震発生に関係する特定の PTX(X は化学成分)領域で検討を行い、また、地殻流体の誘電率の見積もりに関連して、H₂O-NaCl 系流体中の石英の溶解度から流体の誘電率を見積もるアルゴリズムを開発し、これを用いて、既存の H₂O-NaCl 系流体中の石英の溶解実験データを基礎に、流体の誘電率の検討を行う。合わせて、誘電率と水-岩石相互作用の解析に広く用いられている SUPCRT92 のデータ構造との整合性を、

既存の石英+珪灰石（又は単斜輝石）の溶解実験データを用いて検証する。鉱物表面と地殻流体との相互作用に関わる研究として、鉱物界面における H_2O-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。また、地殻流体のマクロ的なダイナミクスとして、チャネリングフローに関する検討を行い、岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展を明らかにする流体流動実験を行う。これらの実験的検討とともに、領家変成帯、三波川変成帯における流体通路（鉱物充填脈）の分布、特性を評価し、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。さらに固体圧試験器を用いて、水が存在する環境下での長石の流動性についての検討を行う。

平成22年度は、代表的な組成の地殻流体（ $H_2O+NaCl+CO_2$ ）の状態方程式確立のため、および地震発生領域での地殻流体の誘電率を明確化するために、地既存のデータが無い温度・圧条件下での $H_2O-NaCl$ 系流体中の石英+珪灰石系の流体の誘電率を見積もる。また、鉱物表面の構造化された水による鉱物の破壊に及ぼす影響についての実験的検討を進め、これに加えて地殻内部における岩石の脱水過程を実験的に再現し、地殻流体の発生メカニズムを明らかにする。地殻内のチャネリングフローに関わる実験として、3次元構造を持つき裂ネットワーク内の流体流動を予測するシミュレーションコードを開発し、封圧下における3次元優先流路の発達を解析するとともに、優先流路の時間発展を明らかにする。また、流体包有物と水 岩石相互作用の自然観察として、変成帯における流体の起源を明らかにするとともに、岩石の脱水による流体発生の実験結果と融合させ、沈み込み帯における地殻流体の発生と移動現象を解明する。さらに固体圧試験器を用いて、水が存在する環境下での長石の流動性についての検討を行う。

平成23年度は、地殻流体の状態方程式の整備に関連して、代表的な組成の地殻流体（ $H_2O+NaCl+CO_2$ ）の中でも、高濃度 $NaCl$ あるいは高濃度 CO_2 水溶液についての検討を行、 $H_2O-NaCl$ 系に CO_2 を加えた3成分系地殻流体の誘電率を理論的に求め、誘電率の温度・圧・組成に関する依存性を定式化する。また、鉱物表面と地殻流体との相互作用に関連する検討として、化学反応と破壊現象の相乗作用を実験的に明らかにして、地殻流体と地殻の破壊との因果関係を示す。また、岩石の脱水実験を行い、脱水過程と岩石の溶解、沈積及び変質・変成過程について検討を行う。これらの実験にあわせて、地殻内部における優先流路の発達過程と固着域との関係するために、室内実験規模と実際の地殻現象との空間的、時間的スケールの差異を検討を行い、チャネリングフローのフラクタル的解析を通じてスケールアップの方法論を明らかにする。また、流体包有物と水 岩石相互作用の自然観察から変成岩の破壊現象と流体との関わりについての野外観察を行う。さらに固体圧試験器を用いて、水が存在する環境下での長石の流動性についての検討を行う。

平成24年度は、定式化した $H_2O-NaCl-CO_2$ 系流体の状態方程式と誘電率を組み込んだ、流体-岩石相互作用シミュレーション用のコアとなるコードを開発する。また、鉱物表面と地殻流体との相互作用に関連して、化学反応と破壊現象の相乗作用を実験的に示し、地殻流体と地殻の破壊との因果関係を明確に示す。また、岩石の脱水実験を行い、脱水過程と岩石の溶解、沈積及び変質・変成過程について検討を行う。これに加えて、室内実験と実現象の時間的、空間的スケールの差異を考慮した地殻内部でのチャネリングフローのモデルを提案する。また、自然観察として、変成帯における流体包有物の解析から、流体の起源を明らかにするとともに、岩石の脱水による流体発生の実験結果と融合させ、沈み込み帯における地殻流体の発生と移動現象を解明する。さらに固体圧試験器を用いて、水が存在する環境下での長石の流動性についての検討を行う。

平成25年度は、地震発生帯の条件に合わせた地殻流体状態方程式を確立させ、これをさらに発展させて、ヒーリング等に関わる問題に適用することを試みる。また、地殻流体-岩石シミュレーションのコアコードを発展させて、地震発生予知に要求される流体-岩石相互作用シミュレータを作成する。さらに、鉱物表面と地殻流体との相互作用として、化学反応と破壊現象の相乗作用を実験的に示し、地殻流体と地殻の破壊との因果関係を明らかにし、これに加えて岩石の脱水実験を行い、脱水過程と岩石の溶解、沈積及び変質・変成過程について検討を行う。チャネリングフローに関わる実験として、観測から推定されるアスペリティーの分布と、実験及び数値シミュレーションから推定される優先流路とアスペリティーのモデルとの比較を行う。また、流体包有物と水 岩石相互作用の自然観察：付加帯、

変成帯における流体の起源を明らかにするとともに、岩石の脱水による流体発生の実験結果と融合させ、沈み込み帯における地殻流体の発生と移動現象を解明する。さらに固体圧試験器を用いて、水が存在する環境下での長石の流動性についての検討を行う。

(7)平成22年度成果の概要：

地殻流体の誘電率の解析のために、岡山大学地球物質科学センターの内燃式ガス圧装置(HIP)を用いた石英+珪灰石の溶解度測定実験を開始した。本年度は、純水中で実験を行ない、熱力学的データベースにより算出した溶解度との対比と、塩水中の溶解度測定実験に必要な反応速度の検討を行った。

岐阜県阿寺断層およびチリ・アタカマ断層近傍の母岩中の流体包有物のトレール解析と組成分析を行なった。その結果、幾つかのトレールが断層運動と整合的な方位を示しており、断層活動により生じた微小割れ目を充填したものであることが明らかとなった。また、何れの断層の近傍でも、流体包有物中に特徴的にガス成分を含むことが示された。

Sibson et al. (1988) や Sibson (1992) により提唱された fault valve model を検証するために、断層活動により生じた裂か中を上昇する純水流体からの石英の沈殿と、それに伴う流体圧の上昇のシミュレーションを行なった。その結果、ほとんどの場合、流体から沈殿する石英の量は裂かの最下部で最も多く、従って、最下部で流体圧の上昇と裂かの閉塞が最も早く達成されることが明らかとなった。この解析結果は、純水であれば、おそらくどの深度から上昇する場合でも適応されると考えられることから、裂か中を上昇する流体からの鉱物沈殿による流体圧の増加が、地震発生深度に対応する必然性が否定される。従って、より一般的な地殻流体である塩水溶媒の物理化学的性質を明らかにする重要性が示された(ここまで主として星野健一が担当)。

断層内や岩石き裂内の流体流動は、優先流路の流体移動が卓越するチャネリングフローであることが明らかにされている。22年度はこのチャネリングフローを3次元に拡張した実験とモデル化を進めた。実験では、花崗岩に引張り裂を2枚作成し、封圧下で、一方向から流体を流し、反対側の流出口を5つのセクションに分けて流体の吐出状態を観察した。その結果、各セクションで流体の流出状態が異なり、3次元でのチャネリングフローを実験的に初めて明らかにすることに成功した。さらにこのときの流出量と差圧との関係から、3次元チャネリングフロー・シミュレーター(GeoFlow)を用いて、3次元き裂内のチャネリングフローの状態を可視化することに成功した(Fig. 1)。

また、超臨界状態でシリカに過飽和な状態の流体から、シリカ鉱物を析出させてき裂を閉塞させる実験を行った。この結果、シリカの過飽和の違いと溶液中の不純物(本年度はAlについて実験)の濃度の関係で析出シリカ鉱物に差異があることが判明し、その析出速度式を策定することができた。これはシリカ鉱物の析出速度式(Rimstidt and Barnes, 1980)を30年ぶりに改訂する大きな成果と考えられる。シリカ鉱物の析出によりき裂が閉塞されるが、その結果流体圧が上昇して析出シリカ鉱物が破壊、移動して再び流動性が上昇する。圧力変動はのこぎり歯状となり、この変化は地震の深部微動のサイクルにほぼ一致している(Fig. 2)。本実験結果が、深部微動のナチュラルアナログが否かは慎重な検討が必要であるが、fault valve modelの実験的検証のひとつと考えられる(ここまで主として土屋範芳が担当)。

地殻流体が地震の発生に強く関与していることが様々な点から指摘されている。例えば、地殻流体の存在は、有効封圧を下げることで、地震の発生を引き起こす可能性があるだけでなく、断層深部延長において、物理化学的に岩石強度低下させることで、塑性変形を促進し、地震発生の引き金になる可能性も指摘されている。しかし、どの程度の水の存在が、下部地殻岩石の軟化を引き起こすのかは未だ明らかになっていない。地震発生帯およびその深部延長における岩石のレオロジー特性に及ぼす水の影響を明らかにするには、そのような条件を再現することのできる固体圧試験機を用いて、変形実験を行う必要がある。本研究では、下部地殻の代表的な岩石である斜長岩のレオロジーにおける水の影響や圧力の影響を定量的に調べるために、現有の固体圧試験機を改良することで、下部地殻に相当する温度・圧力を出力することが可能になった。温度制御システムを構築し、下部地殻に相当する封圧1.2GPa、温度900度にて、斜長岩の変形実験を行った。試料には、下部地殻を代表する鉱物である

斜長石からなる斜長岩（灰長石成分 100 のガラス粉末を真空で焼結したもの）のドライ多結晶体を使い、含水下で斜長岩の塑性変形強度を調べた。含水量が 0.2 wt % の実験では、ドライの試料に比べて、顕著な軟化は見られないが、鏡下においては、円筒形試料の表面部分にのみ著しい塑性変形が認められた。この部分は、強い格子定向配列（LPO）を持つことから、含水下にて試料表面に拡散した水が、局所的な塑性変形を促し、塑性歪が表面に集中したと考えられる。一方、約 1wt % の水を加えた実験では、著しい強度の低下が見られたが、回収した試料には、強い LPO の発達に加え、多数のクラックの発達が見られた。このことは、1.2 GPa、900 °C において、1wt % の水は、斜長岩の水圧破砕を引き起こす可能性があることを示唆している（ここまで主として大槻憲四郎、武藤潤が担当）。

すなわち本研究により、地殻流体の状態方程式のための熱力学的データが整備されつつあり、今後実用的な状態方程式の構築に発展できる。また、断層周辺部やき裂内での流体の発生と移動現象を天然観察と実験的研究から追跡する研究手法がほぼ完成され、今後はよりデータの蓄積を進める必要がある。これら流体の存在により地殻物質（特に長石を含む物質）の力学挙動を明らかにしつつある。平成 22 年度はほぼ計画通りの研究を行うことができ、地震発生と地殻流体の関わりの素過程を明らかにする研究として一定の成果を上げて今後の展開につながるものと考えている。

====平成 23 年度の成果====

本年度では、石英溶解度曲線に基づいた圧力 31 ± 1 MPa、析出温度 430 °C 下の熱水流通実験を行った。この実験では、花崗岩を溶解させた多成分流体を、所定温度の反応管内に流入し、花崗岩表面や花崗岩などの基盤がない状態でのシリカ鉱物の析出様式と析出速度に関する実験的検討を進めている。この結果、花崗岩基盤がある状態とない状態、および過飽和度に応じて、アモルファスシリカ、クリストバライトおよび石英の析出程度が異なることを見だし、高温高压条件下のシリカ鉱物析出反応に関する以下の知見を得た。

- (1) 析出するシリカ鉱物は石英、アモルファスシリカ、クリストバライトの 3 種類がある。
- (2) シリカ鉱物の析出は石英表面のみではなく、石英以外の鉱物表面および自由表面（ステンレス管表面）にも起こりうる。
- (3) 析出するシリカ鉱物の種類は、流体の石英過飽和度、および流体組成によって異なる。石英過飽和度 > 1.5 領域には全ての表面に析出が起こり、単成分流体の場合は 3 種類のシリカ鉱物が析出するが、多成分流体の場合は石英の核形成および結晶成長が支配的となる。 < 1.5 の領域は流体組成によらず石英表面における石英の結晶成長が支配的となる。
- (4) 析出反応経路として石英表面に依存しない水中の核形成と、石英表面に依存する石英表面における結晶成長があるため、見かけの反応速度には石英表面の存在が影響を及ぼす。また、単成分流体よりも多成分流体を用いた場合の方が反応速度は速くなる。

本研究における熱水流通実験は地殻内部の岩石表面と流体を模擬しており、単成分流体および多成分流体からの析出形態の違いを明確にできたことにより、き裂閉塞メカニズムを解明するにあたり重要な情報を得ることができた。天然のき裂は岩石表面が向かい合っていてできていると考えられるので、これらの結果は流体中の Si 濃度が高い場合は一様にき裂が閉塞し、低 Si 濃度領域には岩石の石英分布に依存してき裂閉塞が起こることを示唆している。

さらに本研究課題では、岩石き裂内の流体流動についての実験と数値計算モデルの構築を行っている。この研究は、アスペリティを含むプレート境界部分での流体流動を模擬することを最終目的としているが、本年度は、スケールアップの基本的な方法論の検討、3次元チャネリングフローシミュレーターの開発を主として行っている。

まず、き裂ネットワーク内でのチャネリングフローの発生を明確にするため、連結した二枚のき裂を含む岩石サンプルを用いた透水実験（マルチプルフラクチャー透水実験）を行い、複数き裂がある岩石試料内でも不均質流体流動、すなわちチャネリングフローが生じていることを実験的に初めて明らかにすることができた。この実験結果を基に、新しいコンセプトの DFN モデルシミュレーター GeoFlow を開発した。この GeoFlow を用いた流体流動解析ではき裂の三次元的な連結性と間隙構造が流体流動に及ぼす影響を同時に評価することが可能である。解析の結果、3次元チャネリングフローを考慮す

ることで、マルチプルフラクチャー透水実験の結果を再現でき、岩石き裂ネットワーク中での流体流動を理解するためには、三次元チャネリングフロー（流体流動の偏り）を考慮することが重要であることをラボスケールの実験と計算から示した。

また、ネットワークを構成する単一き裂に関して、寸法に伴う流体流動特性の変化を明らかにするため、様々な寸法のき裂（マルチスケールき裂）について関してき裂面に対し垂直応力（ ~ 30 MPa）が作用した条件下における間隙構造と流体流動特性を評価した。本研究では、き裂の表面形状と封圧下透水実験の結果をもとに間隙構造を決定した。30 MPa 応力条件下での様々な寸法のき裂間隙構造を決定し、間隙構造を特徴付けるパラメータを算出・比較したところ、き裂寸法にともない幾何平均間隙幅は増加するのに対し、接触面積はあまり変動せずにほぼ一定値（せん断変位がないき裂では 60 % 程度、せん断変位を有するき裂では 40 % 程度）をとることが明らかになった。また、実験に使用した全てのき裂中で間隙構造の不均質性に起因した優先流路が形成された（チャネリングフロー）。花崗岩引張り裂中の流路面積は寸法およびせん断変位の有無に依存せず 0-30 % 程度となったことから、岩石き裂中のほとんどの部分は流動には寄与しないことが分かった。以上の実験・数値計算結果を総合的に評価し、ラボスケールを超えたき裂間隙構造の生成手法を開発した。すなわち、岩石き裂の表面形状データを基に、岩石き裂表面の有するフラクタル性を利用して、任意寸法の表面形状を計算機により上下二面生成する。そして、生成したき裂面同士を本研究で求められたき裂接触面積（せん断変位がないき裂では 60 % 程度、せん断変位を有するき裂では 40 % 程度）となるように接触させる。この手法では、ラボスケールでのき裂の表面形状データさえ得ることができれば、フィールドスケールのき裂間隙構造まで予測できる可能性がある。

上記の方法により作成したき裂をさらに拡張し、マルチスケールき裂により構成されるネットワーク中の流体流動解析を GeoFlow により実施した。き裂表面の有するフラクタル性を利用したき裂表面生成アルゴリズムを開発し、マルチスケールのき裂表面形状を生成した。生成したせん断変位を有するマルチスケール計算機き裂の間隙構造に関して、き裂寸法にともない幾何平均間隙幅は増加する傾向があり、標準偏差はほとんど変化しないということが明らかになった。また、流体流動解析から水理学的特性を評価した結果、全てのき裂中で間隙構造の不均質性に起因した優先流路が発生した。き裂浸透率に関してはき裂寸法にともない増加する傾向があり、流路面積は 0-30 % 程度であった。このように、生成したマルチスケール計算機き裂の間隙構造と水理学的特性は、実き裂の示す傾向をよく再現しており、フィールドスケールのき裂間隙構造および水理学的特性の予測に適用できる可能性が十分あることが明らかになった。さらに、GeoFlow を用いてマルチスケールき裂により構成されるネットワーク中の流体流動解析を行った結果、三次元チャネリングフローに起因して、従来の平行平板き裂により構成されたネットワークを用いた流動解析では再現できない現象があることが明らかになった。今後この実験やシミュレーションに、反応速度式や地殻流体に状態方程式を組み込むことにより、実際のき裂な断面、さらにはデコルマ面などにおける流体流動の特性を評価できる方法論の開発を進めていきたい。

- (8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
Gu, X., Xie, X., Wu, X., Lai, J., Hoshino, K. and Zhu, G. (2010) Ferrosepiolite, IMA 2010-061. CNMNC Newsletter, in print.
Hirano, N., Yamamoto, K., Okamoto, A., and Tsuchiya, N., Observation of quartz fracturing under the hydrothermal condition using visible type autoclave. [Water-Rock Interaction, 13, (2010), 653-656]
Saisyu, H., Okamoto, A. and Tsuchiya, N., Precipitation of silica minerals in hydrothermal Flow-through experiments. [Water-Rock Interaction, 13, (2010), 669-672]
Watanabe, N., Ishibashi, T., Ohsaki, Y., Tsuchiya, Y., Tamagawa, T. Hirano, N., Okabe, H. Tsuchiya, N. "Precise Three-dimensional Numerical Modeling of Fracture Flow Coupled with X-ray Computed Tomography for Reservoir Core Samples. SPE Journal (2011), in press.

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

断層やき裂内の流体の発生とシリカ鉱物等の析出によるき裂類の閉塞に関する天然観察と実験的研究を進め、fault valve model の実効性の検証と時間発展の定式化を進めるとともに、高度変成岩とその中の流体包有物の観察から中部地殻威信の流体の発生と移動についての知見を獲得する。

また、固体圧試験機を用いた予察的な高温高压変形実験において、斜長岩の変形特性及び強度は、加えた流体量に依存することが明らかになったことから、今後は、含水量を系統的に変化させた実験と FTIR による含水量の測定を行い、含水量(もしくは水のフュガシティ)と強度および変形機構(脆性破壊か塑性流動)との関係を定量的に明らかにする。回収した試料は SEM-EBSD で結晶方位の解析を行い変形機構を明らかにする。得られた力学データは、これまでに報告されているガス圧試験機を用いた斜長岩の構成則と比較し、構成則パラメータの改善(特に水のフュガシティ係数、活性化エネルギー)を行う。新たに得られたパラメータは、下部地殻岩石の強度における水の影響と圧力の影響を分離することで、地殻の塑性流動モデルの発展に大きく貢献することが期待される。

23 年度の実施計画は当初計画と大きな差異はないが、22 年度の進展が予想以上に良かったことから、より実効的な研究に進みたい。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東北大学大学院環境科学研究科 土屋範芳

東北大学大学院理学研究科 大槻憲四郎, 武藤 潤

他機関との共同研究の有無 : 有

広島大学大学院理学研究科 星野健一

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院環境科学研究科

電話 : 022-795-4851

e-mail : tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

URL : <http://geo.kankyo.tohoku.ac.jp/gmel/>

(12) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 土屋範芳

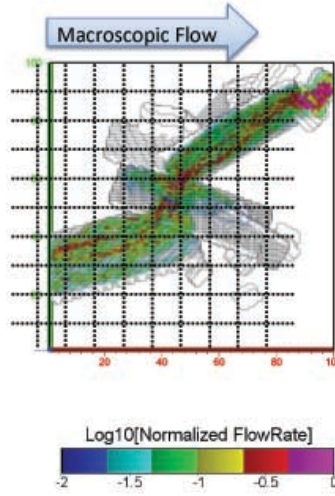
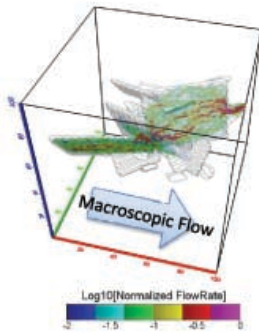
所属 : 東北大学大学院環境科学研究科

電話 : 022-795-6335

FAX : 022-795-6336

e-mail : tsuchiya@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

(a) Side View



(b) Top View

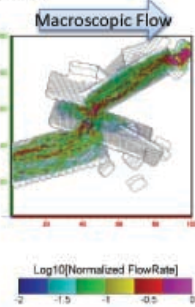
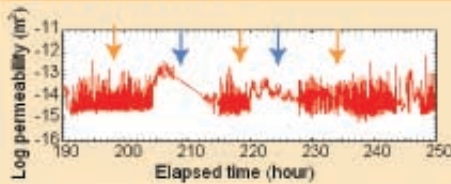


Fig. 1 GeoFlowによる3Dチャネリングフロー・シミュレーション

Implications

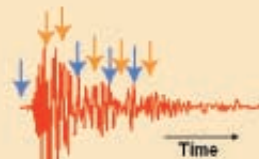


The decrease and recover of permeability was generated by fracture **sealing** and the plastic **deformation** of the reaction vessel. It caused the relatively long duration time. It also may related to longer period tremors.

Long period tremors



The cycle may occur easily because of slight deformation of host rocks or rotation of minerals etc.



High frequency earthquakes

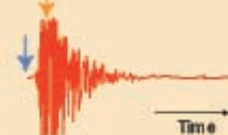


Fig.2 流通式熱水実験によるき裂閉塞過程 (のこぎり歯状圧力変動)