

(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及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及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．更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，及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．更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い， $H_2O-NaCl$ 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．更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．更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，これを更に発展させて，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．更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) 計画期間中 (平成 21 年度 ~ 25 年度) の成果の概要 :

$H_2O-NaCl-CO_2$ 系流体の状態方程式と誘電率:

本年度まとめ

地殻中の流体の熱力学的性質は，流体の誘電率に大きく依存している．本研究では，最も普遍的な地殻流体である $H_2O-NaCl$ 系流体中の高温・高圧における石英と珪灰石の溶解度から，SUPCRT92 等の既存の熱力学的データベースに整合的な同系流体の“有効”誘電率を求める．これにより，これまで純水溶媒中でしか用いることが出来なかった溶存種の熱力学的状態関数が，塩水溶媒中でも解析可能になる．本年度は，この目的のため 100MPa, 500, 400 および 300 の実験により 1 molal NaCl 溶液中の両鉱物の溶解度から有効誘電率を求めた．その結果，いずれの温度においても，この塩水の有効誘電率は純水のそれより高く，両者の差は 300 までは低温に向けて増加する事が確認された．

また，炭質物の加熱実験により，炭質物の熱熟成度を基にした断層温度計の開発を試みた．その結果，炭質物の反射率およびラマンシフトを熟成度の指標とした温度計の可能性が示された．

5 か年まとめ

地震発生領域における水 - 岩石相互作用の解析の精密化のために，最も普遍的な地殻流体である $H_2O-NaCl$ 系流体中の 100MPa, 500, 400 および 300 における石英と珪灰石の溶解度から，SUPCRT92 等の既存の熱力学的データベースに整合的な同系流体の“有効”誘電率を求めた．その結果に基づく予察的なシミュレーションによれば，推定される誘電率の変曲点付近で急激な水-岩石相互作用が起こることが示され，地殻中の同作用の普遍的な温度依存性が塩水の誘電率変化に起因する可能性が示された．このことは，孔隙流体の圧上昇をもたらす鉱物の沈殿が，400 ~ 300 付近で普遍的に生じることを意味し，Sibson らの一連の研究で提唱された fault valve model の妥当性を指示するものである．

また，純水の上昇に伴う水 - 岩石相互作用の解析結果から，先の fault valve model に効果的な鉱物沈殿を引き起す沸騰現象は，最下底の熱水溜りが最上位の地表地殻でしか生じないことを明らかにし，流体圧の上昇を引き起す鉱物沈殿は，上記の塩水の誘電率の温度依存性によるはずであることが示された．

炭質物の加熱実験により，炭質物の熱熟成度を基にした断層温度計の開発を試みた．その結果，炭質物の反射率およびラマンシフトを熟成度の指標とした温度計の可能性が示された．

鉱物表面と地殻流体との相互作用:

本年度まとめ

鉱物表面における，水の構造化に関する分光学的研究 (IR, Raman 散乱計測) を行うとともに，鉱物表面での水の構造化による IR スペクトルの変化を再現する分子動力学的 (MD) 検討を行った．その結果，MD によって，石英表面の水の IR スペクトルを計算で求めることに成功した．この成果をもとに，鉱物界面での水の摩擦係数の変化を推定することに展開したい．

また，岩石き裂内 3 次元チャネリングフローのシミュレーターを開発し，地殻中での流体流動の様式を推定することが可能となった．このシミュレーターによりフィールドスケールでのき裂内流動モデルを提案することが可能である．また，き裂内の二相流動に関する実験と計算機モデル構築を行い，岩石き裂内での流体相変化が生じた場合に，濡れ相と非濡れ相が同時に流動することはないことを実証した．

5 か年まとめ

本研究により，地殻内は，シリカの溶解と析出反応によって，透水性地殻と不透水性地殻に区分できることを実験的ならびに数値モデルとして明らかにすることに成功した．このことは，透水性地殻と不透水性地殻の境界付近に地殻流体が対流する可能性を示しており，地震発生帯が地球化学反応によって規定されることを示している．また，地殻のき裂内流体流動は，優先流路を形成するチャネリング

フローであり、さらに二相流動となったときは、濡れ相と非濡れ相が同時に流動せず、滞留することを明らかにした。これは、地震発生帯における流体の特性を理解する上で有用な成果である。チャネリングフローモデルは、3次元での計算を可能とし、さらに実フィールド規模への科スケール拡張を来ない、実際のフィールドでの現象を良く表現できる計算機モデルを構築した。

地殻流体の微視的挙動として、鉱物界面での水の構造化を実験的に実証するとともに、分子動力学的手法を用いて構造化の要因やその程度を明らかにすることができた。今後この界面水モデルを用いて、鉱物界面の摩擦係数の推定などに展開可能である。

固体圧試験器を用いた研究:

本年度まとめ

固体圧試験機を用いて、水が存在する環境下での下部地殻の主要較正鉱物である長石の塑性流動特性についての検討を行った。無水の人工アノサイト多結晶体に、最大0.5 wt%の水を導入させながら流動特性を調べた。出発試料は、真空焼結法により作成したもので、粒径が1 μm程度である。固体圧変形試験機を使い、0.5wt%の水を加え剪断ひずみ速度を変化させることで、含水下での保持時間を変化させて、強度に対する水の効果を評価した。剪断ひずみ速度が速い(保持時間が短い)時は、差応力が1000MPaまで達し降伏する。一方、ひずみ速度が遅い(保持時間が長い)場合は、ピーク強度の後、大きくひずみ軟化することが明らかになった。微細組織観察から、塑性ひずみの局所化が認められ、メルトを含んだ斜長石多結晶体と同様、微小試料内においても、含水量の不均質性が粘性率の変化を引き起こすことを示唆し、天然の断層帯においても、水の非平衡な拡散に伴い、変形挙動が変化することが推察できる。

5か年まとめ

本研究では下部地殻領域での岩石の流動変形特性に及ぼす水の効果を明らかにするために、水が存在する環境下での長石の塑性流動特性についての検討を行った。固体圧試験機を用いて、無水の人工アノサイト多結晶体に、最大0.5 wt%の水を導入させながら流動特性を調べた。出発試料は、真空焼結法により作成したもので、粒径が1 - 3 μm、粒界にシリカに富むメルトを最大6%含むものと含まないものの二種類を用いた。固体圧変形試験機を使い、下部地殻条件下(封圧1GPa、温度900度)で行われた変形実験から、水の存在下で無水の長石試料は軟らかくなることが明らかになった。含水下での強度の低下量は、加えた水の量に比例しひずみ速度に反比例する。またメルトを含むものは同じひずみ速度でもメルトを含まないものに比べ、強度低下が大きい。微細組織観察とFTIRを用いた含水量測定から、塑性ひずみの局所化と含水量の不均質性が認められ、微小試料内においても、含水量の不均質性が粘性率の変化を引き起こすことを示唆している。従って、天然の断層帯においても、水の非平衡な拡散に伴い、変形挙やレオロジー特性(粘性率など)が変化することが推察できる。

- (8)平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
SEKIGUCHI, C., HIRANO, N., OKAMOTO, A., and TSUCHIYA, N. (2013) Spectroscopic determination of the critical temperatures and pressures of H₂O, CO₂ and C₂H₅OH, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 108, 1-10.
Saishu, H., Okamoto, A., and Tsuchiya, N. (2014), The significance of silica precipitation on the formation of the permeable - impermeable boundary within Earth's crust, *Terra Nova*, Article first published online: 31 JAN 2014, DOI: 10.1111/ter.12093

(9)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

(10) 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/

(11) 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