

(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、地震発生に關係する特定の 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 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 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（ $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CO}_2$ ）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 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 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（ $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CO}_2$ ）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， $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 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，定式化された $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 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) 平成 24 年度成果の概要：

$\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 系流体の状態方程式と誘電率：

100 MPa，400 ならびに 300 における，1 モル NaCl 溶液中の石英と珪灰石の溶解度測定実験から，同溶液の有効誘電率を見積もることが出来た．その結果，同有効誘電率は純水の誘電率に比べ，400 で 20 %，300 で 36 % 程度高く，Hoshino et al. (2009) が予想したように，低温に向けて純水の誘電率との乖離が増大するという傾向が確認された．有効誘電率の圧と塩濃度依存性の確認が遅れているため，有効誘電率の定式化に至っていないが，仮想的な有効誘電率を組込んだ水 - 岩石相互作用シミュレーション用のコアとなるコードの試作はほぼ終了し，上記の実験条件における予察的なシミュレーションを行った．

鉱物表面と地殻流体との相互作用：

鉱物表面の薄膜水の分子状態を検討するために，顕微ラマン分光，赤外吸収スペクトルの計測を行い，自由水と薄膜水の水の分子状態の比較を行った．その結果，石英基板上の薄膜水は，自由水に比べて ice-like な分子振動モードが発達し，構造化された "かたい" 水となっていることが明らかとなった．これは，石英表面の Si と水分子が Si-OH シラノール基とこれに規制される水素結合による構造化が生じているためと推定される．この構造化された水は地震発生帯での鉱物界面でも形成されている可能性があり，この界面薄膜水の構造化と岩石の破壊現象及び摩擦係数の低下について検討を進める必要がある．また，岩石き裂内の流体流動に関するシミュレーターを製作し，更にフラクタル則に基づいて，岩石き裂のスケールを実規模まで拡張するアルゴリズムを開発した．

固体圧試験器を用いた研究：

本研究では下部地殻領域での岩石の変形特性に及ぼす水の効果を明らかにするために，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．平均粒径 3 ミクロン，5 vol% のシリカリッチなメルトを含む多結晶体を，固体圧試験機を使い 900 度，封圧 1 GPa で剪断変形実験を行った．剪断ひずみ速度約 $10^{-4}/\text{s}$ でドライ（無水試料そのまま）及び 0.1-0.3wt% の水を加えた実験では，差応力が 1000 MPa まで達する．一方，0.5 wt% の水を加えたときのみ，顕著な弱化が見られた．回収試料の微細組織観察から，添加した水が少ないほど破碎流動が卓越することが明らかになった．0.5 wt% の水を添加した試料では塑性変形が卓越しており，ひずみの局所化も認められた．赤外分光法面分析から，0.1wt% の水を加えて破碎流動が卓越した試料の含水量は，最大で 130 ppm H_2O であった．一方，0.5 wt% の水を添加し，剪断ひずみが局所化している領域では最大 550ppm H_2O の水が含まれていた．また，この試料内では破碎している領域も見られ，含水量は 250 ppm H_2O 程度であった．このように，微小試料内においても，含水量の不均質性によって，脆性変形から塑性流動までの変形機構の遷移が認められた．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，変形挙動が変化することが推察できる．

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Abe, J., Hiranano, N. and Tsuchiya, N., Infrared spectroscopic study of water in mesoporous silica under supercritical conditions. [Journal of Material Science, 47, (2012), 7971-7977]

Ishibashi, T., N. Watanabe, N. Hirano, A. Okamoto, and N. Tsuchiya (2012), GeoFlow: A novel model simulator for prediction of the 3-D channeling flow in a rock fracture network[Water Resour. Res., 48, W07601, doi:10.1029/2011WR011226]

武藤 潤，大園 真子 (2012) 東日本太平洋沖地震後の余効変動解析に向けた東北日本弧レオロジー断面. 地質学雑誌 特集号（東北地方太平洋沖地震 - 統合的理解に向けて - ）118 323-333.

Nakamura, Y., Muto, J., Nagahama, H., Shimizu, I., Miura, T., and Arakawa, I. (2012) Amorphization of

quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces Geophys. Res. Lett. 39 L21303.
Ohzono, M., Y. Ohta, T. Inuma, S. Miura, and J. Muto (2012) Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. Earth Planets and Space 64 759-764.
Saishu, H., Okamoto, A. and Tsuchiya, N., Mineralogical variation of silica induced by Al and Na in hydrothermal solutions. [American Mineralogist, 97, (2012), 2060-2063]

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

H₂O-NaCl-CO₂ 系流体の状態方程式と誘電率:

高温・高圧における塩水の有効誘電率を見積もるための実験手法が確立出来たため, 更に広範な温度・圧範囲とより低塩濃度の溶解度測定実験を行い, 有効誘電率の温度・圧・塩濃度依存性の定式化を完成させる. これを, 試作中の水-岩石相互作用シミュレーション用コードに組み込み, 地震発生予知に要求されるシミュレータを完成する. これを用いて, 地震発生場での水-岩石相互作用による孔隙や裂かのヒーリング, 及びそれによる流体圧の上昇をシミュレートする.

鉱物表面と地殻流体との相互作用:

さまざまな鉱物の表面における薄膜水の構造化について明らかにするとともに, これらの構造化水の摩擦係数や拡散係数の推定方法の検討を行う. また, 岩石き裂内のチャネリングフローについて, 気液二相流やぬれ性の異なる混合流体の流動特性について検討を行い, 地震発生帯の特にアスペリティ域での選択的流体流動についての実験的検討とシミュレーションを進める.

固体圧試験器を用いた研究:

引き続き固体圧試験機を用いて, 下部地殻構成鉱物である斜長石多結晶体の流動特性に及ぼす水の効果を検討する. 今年度の結果から, 水の不均質な分布が局所的な試料の流動特性を決めていることが明らかになったが, 具体的な水の状態及び塑性変形に必要な含水量は明らかになっていない. そこで, H25 年度は, 試料内部での含水量測定から水の存在状態を考察すると共に, その不均質分布と変形との関連性について議論する. 特に, 高温高圧下での水の拡散特性に関しても調べ, 下部地殻条件下における高圧流体が存在した場合の流体の位相特性と岩石の変形機構に関して明らかにする.

(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