

(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 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 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（ $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CO}_2$ ）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 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 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．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（ $\text{H}_2\text{O}+\text{NaCl}+\text{CO}_2$ ）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、 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 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．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．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 23 年度成果の概要：

1) 地殻流体からシリカの析出速度

熱水流通実験を行い、350-360 °C の条件で花崗岩を溶解した流体を 400 °C の環境下で、花崗岩基板上にシリカ鉱物を析出させた。これはシリカの溶解度の逆温度依存性（温度が高いほど溶解度が下がる）性質を利用して、超臨界状態でシリカに過飽和な状態を作り出した実験である。この結果、析出する鉱物の種類（アモルファスシリカ、クリストバライト、石英）は過飽和度によって支配されていること、さらに析出速度は、溶液中の Al の濃度に強く依存していることを初めて明らかにした。また、溶液中の Al 濃度により析出物中の Al の含有量も支配されることが明らかとなった。これらの成果をまとめ公表論文として投稿中である。この成果により、地殻流体からシリカが析出する環境と速度を明確に規定できるようになると期待される。

2) 流体包有物と方解石の析出プロセス

四万十帯の泥質岩中の流体包有物の観察から、この地方には水に富むものと二酸化炭素に富むものを二つがあり、このうち二酸化炭素の流体の性質から、方解石の析出メカニズムについて明らかにした。方解石の析出についての従来の知見は限られており、本年度の研究により、二酸化炭素と Ca を含む流体から、方解石の析出条件を明らかにすることができた。

3) 固体圧試験機を用いた斜長石の変形実験：水の効果

FTIR, SEM-EBSD を用いて、まず出発試料である人工斜長石多結晶体の評価を行った。FTIR を用いた含水量の測定から、出発試料は波数 3400cm⁻¹ 付近に全く水の吸収を示さない非常にドライな試料であることが確認された。また SEM-EBSD 分析から、出発試料は粒径 2 – 3 ミクロン、アスペクト比 2-3 程度で、結晶格子定向配向を持たない多結晶体である。引き続き、固体圧試験機を用いて人工斜長石多結晶体の塑性変形実験（軸圧縮および剪断変形）を行った。0.5wt% の H₂O, 封圧 1GPa, 温度 900 °C, 歪速度 10⁻⁴/s および 0.1 wt % H₂O, 封圧 1GPa, 温度 950 °C, 10⁻⁵/s で行った実験では、試料はカタラスティックフローにより変形した。FTIR 測定から、含水試料は、メルトのピークに類似したような非対称なピークを持つことが明らかになった。今後は、溶融塩を用いた変形アセンブリを使用し、より高温（1000 °C 以上）での変形実験を行うのと共に、試料を変形前に高温高压含水下で長時間保持することにより、試料中へ水を導入し、多結晶体を軟化させることを目指す。

4) 地殻流体の誘電率

誘電率は、流体の化学的特徴を決定づける key parameter であるが、一般的な地殻流体である塩水の高温高压化での誘電率は未だ明らかになっていない。そこで、塩水の“有効”誘電率を求めるため、高温高压化での塩水中の石英と珪灰石の溶解度測定実験を行なっている。本年度の実験から、100 MPa では 300 °C 付近より低温側で、塩水の誘電率が純水よりも高くなるとの結果を得た。次年度は圧力と塩濃度を変えて、実験を継続する予定である。

5) 石墨化度

堆積岩中の炭質物の石墨化度は、変成相解析により示される変成条件よりもより短期間の熱履歴を記録している可能性がある。これを確認するため、延岡衝上断層下盤の、石英脈近傍の泥岩中の炭質物の測定を行った。その結果、これまで 250 °C 付近と見積もられていた泥岩中の炭質物は、脈近傍では 400 °C 程度を示すことが明らかとなった。また、この結果と石英脈中の流体包有物のアイソコアから見積もられた圧力は 220 MPa 程度となり、これまでの研究と調和的である。従って、地震性断層などの短期間の熱的イベントの解析ツールとしての、炭質物温度計の可能性が示された。

(8) 平成 23 年度の成果に関連の深いもので、平成 23 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Atsushi Okamoto, Yuichi Ogasawara and Noriyoshi Tsuchiya, Progress of hydration reactions in olivine-

H₂O and orthopyroxenite-H₂O systems at 250 °C and vapor-saturated pressure. [Chemical Geology, 289, (2011), 245-255]

Akira Takeda, Shin-ichi Yamasaki, Hirofumi Tsukada, Yuichi Takaku, Shun'ichi Hisamatsu, and Noriyoshi Tsuchiya, Determination of total contents of bromine, iodine and several trace elements in soil by polarizing energy dispersive X-ray Fluorescence spectrometry. [Soil Science and Plant Nutrition, 57 (1), (2011), 19-28]

山崎慎一, 松波寿弥, 武田晃, 木村和彦, 山路功, 小川泰正, 土屋範芳, 偏光式エネルギー分散型蛍光 X 線分析法による土壌および底質中の微量元素の同時分析. [分析化学, 69 (4), (2011), 315-323]

Shiping Zhang, Fangming Jin, Xu Zeng, Jiajun Hu, Zhibao Huo, Yuanqing Wang, Noriaki Watanabe, Nobuo Hirano, and Noriyoshi Tsuchiya, Effects of general zero-valent metals power of Co/W/Ni/Fe on hydrogen production with H₂S as a reductant under hydrothermal conditions. [International Journal of Hydrogen Energy, 36, (2011), 8878-8884]

Noriaki Watanabe, Takuya Ishibashi, Nobuo Hirano, Yutaka Ohsaki, Yoshihiro Tsuchiya, Tetsuya Tamagawa, Hiroshi Okabe, and Noriyoshi Tsuchiya, Precise 3D Numerical Modeling of Fracture Flow Coupled With X-Ray Computed Tomography for Reservoir Core Samples. [SPE (Society of Petroleum Engineers) Journal, 16 (3), (2011), 683-691]

Putri Setiani, Javier Vilcaez, Noriaki Watanabe, Atsushi Kishita, Noriyoshi Tsuchiya, Enhanced hydrogen production from biomass via the sulfur redox cycle under hydrothermal conditions. [International Journal of Hydrogen Energy, 36, (2011), 10674-10682]

Arif Susanto, Noriyoshi Tsuchiya, Emmy Suparka, Nobuo Hirano, Atsushi Kishita, Yudi Indra Kusumah, Geology and Surface Hydrothermal Alteration of Malabar Area, Northern Part of the Wayang Windu Geothermal Field, Indonesia. [Geothermal Resources Council Transaction, 35, (2011), 1029-1031]

Putri Setiani, Javier Vilcaez, Noriaki Watanabe, Atsushi Kishita, and Noriyoshi Tsuchiya, Sustainable and Enhanced Hydrogen Production from Biomass through Sulfur Redox Cycle using Georeactor. [Geothermal Resources Council Transaction, 35, (2011), 135-138]

Noriyoshi Tsuchiya and Noriaki Watanabe, Advanced Direct Use of Geothermal Energy for Hydrogen Production and Material Conversion. [Geothermal Resources Council Transaction, 35, (2011), 143-146]

梶原雅博, 小川泰正, 土屋範芳, 酸性河川中でのレアメタル (In, Ga) および有害元素 (As, Pb) の吸着・分別挙動に関する実験的研究. [資源地質, 61 (3), (2011), 167-180]

片山郁夫, 東真太郎, 武藤潤, 海洋モホ面でのレオロジー的不連続性, 月刊地球 (受理)。

武藤 潤, 岩石のレオロジーから見る東北日本弧の変形, 日本鉱物学会 2011 年茨城大会 (招待講演)

Muto, J., Ohzono, M., 2011, Rheological structure of the northeastern Japan toward precise modeling of post-seismic relaxation of the Mw 9.0 Tohoku earthquake. AGU Fall Meeting, San Francisco.

中村悠, 武藤 潤, 長濱裕幸, 三浦 崇, 荒川 一郎, 2011, ピンオンディスク摩擦実験による石英の非晶質化: ラマン分光分析. 地球惑星科学連合 2011 年大会, 幕張メッセ.

中村 悠・武藤 潤・長濱 裕幸・三浦 崇・荒川 一郎, 2011, ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化. 日本地質学会 118 年学実大会, 水戸.

Nakamura, Y., Muto, J., Nagahama, H., Miura, T., Arakawa, I., and Shimizu, I., 2011, Physical processes of quartz amorphization due to friction. AGU Fall Meeting, San Francisco

(9) 平成 24 年度実施計画の概要:

平成 24 年度は, 定式化した H₂O-NaCl-CO₂ 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. 塩水の誘電率については, 圧力と塩濃度を変えた実験を行い, 状態方程式の精密化を進める. 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。さらに、岩石の水和実験、脱水実験を行い、水和過程と脱水過程における岩石の溶解、沈積及び変質・変成過程について検討を行う。従来の研究計画では脱水過程のみであったが、地震素過程として水和過程も重要なことから実験項目として加えることとする。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2次元ならびに3次元モデルを提案する。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。

(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