

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2009～2014

課題番号：21109005

研究課題名（和文）地殻流体の形態と物性

研究課題名（英文）Microstructure and Physical Properties of intergranular Geofluids

研究代表者

中村 美千彦（NAKAMURA, MICHHIKO）

東北大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70260528

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 221,200,000 円

研究成果の概要（和文）：地球物理学観測によって取得した物性値を、地殻流体の分布や量に翻訳するために必要な、岩石-塩水系の弾性波速度や電気比抵抗値を、高温高圧実験や分子動力学計算によりあらたに決定した。また、多結晶体での地震波の減衰の粒径依存性を幅広い周波数で定式化したほか、蛇紋岩の弾性波速度の異方性の決定、東北日本弧の地殻構造に関する地質・岩石学的制約のコンパイルなどを通じて、領域の融合研究であるGeofluid Mapの作成に貢献するとともに、断層粘土や蛇紋石ガウジの摩擦挙動、多結晶体岩石中での化学輸送機構やマグマ供給系を通じたCO₂輸送機構を定式化し、Geofluid Dynamicsの創成を果たした。

研究成果の概要（英文）：In order to estimate the distribution and amount of inter-granular fluids based on the geophysical observations of the crust in subduction zones, we determined elastic wave velocities and electrical resistivities of some rocks, fluids and their composites. For the purpose of building a “Geofluid Map”, following outcomes were obtained: grain size sensitivities of seismic wave attenuation in polycrystalline aggregates were formulated in a wide frequency range; anisotropy of seismic wave velocities of serpentinite was determined, and geological and petrological constraints on the lithological structure of the Northeastern Japan arc were compiled. We also determined the frictional behavior of fault clays and serpentine gauges and chemical transport mechanisms between fluids and polycrystalline rocks, and formulated CO₂-fluxing through volcanic magma-feeding systems. These have contributed to create a new research fields “Geofluid Dynamic”.

研究分野：岩石学・火山学

キーワード：地殻流体 岩石物性 岩石粒界 分子動力学 弾性波速度

1. 研究開始当初の背景

2000 年以降世界の地球科学で「地殻流体」に対する関心が急速に高まり、諸外国の研究者は、堆積盆、地熱帯、鉱床脈など地球表層付近に於ける「地殻流体」と岩石の相互作用を、「資源」「エネルギー」「環境」の立場から活発に研究していた。複数のプレートがせめぎ合う『地球上で最も激しい変動帯』に位置する日本列島は、沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートに由来する熱水フラックスを受けて『蒸し焼き状態』にあり、「地震発生」および「マグマ火山活動」などの変動現象に「地殻流体」が深く関わっていることが様々な証拠から明らかにされつつあった。しかし、これらの証拠は、対象となる場所やスケールに関して断片的であり、また異なる手法から得られる情報が地殻流体に直接関わるパラメータに翻訳されてはならず、有機的に結びついていなかった。このため、いかなる組成・相・流量の流体がどこに分布し、地殻流体がどのように変動現象と関わっているのか、その全体像は未解明であった。これらの根源的な成因と役割を解明するには、水溶液-マグマ-超臨界流体-固体の振る舞いを、ミクロな構造・素過程からマクロな発生・移動にいたる幅広いレンジで研究する必要があった。本計画研究の代表者は、 H_2O を含む岩石の粒界組織平衡を研究し、流体間隙の形態や透水率解析の実験的アプローチを確立した。また分担者は、 H_2O の分子シミュレーションにより、含水鉱物の構造、鉱物表面と H_2O の関係、及びそれらに基づくマクロスケールでの物性を系統的に明らかにしたり、岩石の粒界に存在する流体相の粒界面組織を高圧実験と電顕観察から解明し、岩石化学と物性における粒界の重要性を世界に先駆けて提唱した実績を持っていた。

2. 研究の目的

本研究では、地球物理観測データを地殻流体の量や存在形態に翻訳するための物質科学的基礎の確立を目的とする。領域内の岩石物性研究を統合するための仕組みである標準岩石モデル (PROM) の作成を主導し、Geofluid Map の作成に寄与する。さらに、岩石中の流体移動・物質輸送特性を実験的に決定し、A03 が進めるダイナミクスモデルと連携することで、Geofluid Dynamics を創成する。そのために、まず分子動力学計算・高分解能電顕観察/高温高圧実験・その場分光分析・岩石摩擦壊実験などの多角的手法を用いて、化学結合レベルから結晶粒界 (nm)・岩石組織 (ミクロン~cm) レベルで岩石物性を理解し、次にそれを理論 (均質化法・物理的相似則) に基づいて m~km スケールのマクロ物性に拡張する。このような、地球物理観測と緊密に結合したマルチスケール総合物質科学としての地殻流体研究領域を創成する。

沈み込み帯における地殻流体の分布 (Geofluid Map) を沈み込み帯の地殻や最上部

マントルを構成する岩石の大部分は、結晶粒界に超臨界流体を含んでいると考えられることが、計画研究 A01-1, 2 などによる世界各地の電気伝導度観測から明らかになってきた。このような粒間流体は、少量でも岩石の物性を大きく変えるとともに、熱や物質を輸送し、沈み込み帯の変動現象に大きな影響を与えている。本計画研究は、このような流体を含む岩石の物性や輸送特性を、物質科学的手法で多角的に扱い、地球物理観測データを地殻流体の量や存在形態へと翻訳 (解釈) し、計画研究 A03-1 と共同して“Geofluid Map”を描くための基礎を構築する部分を担当する。

3. 研究の方法

- (1) 下部地殻条件における流体の分布形態や連結度を組織平衡実験によって決定する。
- (2) 粒間流体の形態に対する観測物性の依存性を、アナログ物質を用いて調べる。
- (3) 電子状態計算と分子シミュレーションに基づく、予測性のあるナノ構造-物性モデルを構築する。それによって、地殻を構成する鉱物と流体の物性および両者の界面の性質を求め、(2)の実験結果と比較検証する。
- (4) 上記のモデルと組み合わせた均質化解析法によって、岩石の微細構造からマクロな流体の挙動 (拡散係数・透水係数など) を予測する。
- (5) 高温高圧その場でのラマン・赤外分光法、ブリルアン散乱法によって、地殻流体の化学種・局所構造と弾性波速度を求め、構造と物性の関係を明らかにする。
- (6) 高温高圧下での蛇紋岩の変形実験により、含水マントルの脆性-延性挙動を明らかにする。
- (7) 地殻中部条件における断層滑りを実験的に再現し、高間隙水圧下での摩擦構成則を確立する。

これら計画研究内の成果を核として、流体を含む岩石の諸物性に関する現在の物質科学的理解の到達点を統合した“標準岩石モデル”を作成することを目指す。

4. 研究成果

1. PROM モデルの構築：A01-1, A01-2 班が地球物理学観測によって取得した物性値は、流体量とともに岩石の種類 (岩相) の関数である。よって Geofluid Map を作成するには、岩相ごとの物性値をコンパイルした PROM (Preliminary Reference Rock Model: 標準岩石モデル) を構築する必要があった。A02-2 班が中心となってこの作業を進め、不足していた物性データは、A02-1, A02-2 の分担者による新たな実験的研究によって補完するとともに、観測地域の岩相をよりの確に制約するため、地質学的・岩石学的な情報を効果的に組み入れる方法を考案した。PROM はこれらの過程を通じて、計画研究間の融合研究を効果的に推進するための求心力を持った組織

みとして機能したと同時に、その結果は4つの計画研究をまたいだ共同研究に活用された (Hoshide et al. 2014, Iwamori et al., 2014)。

2. 塩水およびそれを粒界に含む岩石の物性解明：塩水の電気伝導度は、電磁気観測の結果を説明する上で必要な物性値であるが、実験の困難さから 400 MPa 以下の低圧、0.6 wt% 以下の低塩濃度のデータしか存在しない。そこで 1 GPa, 1000 K を超える地殻の温度・圧力で使用でき、塩との相互作用を精密に再現できる H_2O モデルを新たに開発し (Sakuma et al., J. Chem. Phys., 2013)、 H_2O -NaCl 流体の分子動力学 (MD) 計算を実施した。この新しい H_2O モデルは、条件に応じて点電荷の値が変化し (電荷変動型)、分子内振動も取り入れている。右図に MD 計算によって得られた H_2O -NaCl (0.58 wt%) 流体の電気伝導度の深さ変化を示す。この結果から、 H_2O -NaCl 流体の電気伝導度は、深さ 10~20 km で地表面付近よりも 1 桁大きな極大値を持ち、その後ほぼ一定値を取ることがわかる (Sakuma et al., 投稿準備中)。電磁気観測でも、一般に深さ 20 km 付近に電気伝導度の極大値を持ち、この点では MD 計算と整合的であるが、その極大値は地表付近と比べて 2 桁程度大きい。この観測を説明するためには、流体の連結度の変化か流体中の塩濃度の変化を考慮する必要性がある。

3. その他の主な成果

2013 年以降：渡辺は、蛇紋岩など異方性の強い鉱物を含む岩石の弾性波速度の正確な計算法を考案し、A01-1 班が描く地震波トモグラフィから、楔型マンツルの含水域を推定することを可能とした。さらに、高温高压下において岩塩-水系の弾性波速度・電気比抵抗を同時測定する装置を開発し、結晶粒界の水が 2 次元薄膜状に存在することを明らかにした。佐久間は、雲母表面への水の吸着エネルギーを分子動力学 (MD) 計算により求め、断層粘土の摩擦挙動をナノスケールから理解することに成功した。中村らは、近年世界各地の沈み込み帯で発見された CO_2 fluxing (地殻深部から浅部へマグマ供給系を通じて二酸化炭素に富む流体が大規模に輸送される現象) の定式化に成功した。2012 年：市川は、多孔質体中の流体輸送現象の均質化法による理論体系を確立した。神崎らは、沈み込み帯深部に水を運搬しうる含水鉱物相 (K-cymrite) の OH 局所構造を NMR 分光法により明らかにした。2011 年：上原と清水らは、スラブ内地震などに重要な、高温下における蛇紋石ガウジの摩擦挙動を実験により明らかにした。武井と平賀は、新たに開発した実験装置により、多結晶体での地震波の減衰と散乱を幅広い周波数帯で定式化することに成功し、A01-1 班の観測から地震波地殻流体の量を正確に見積もる理論的基礎を築いた。佐久間と河村は、雲母-水の界面構造の MD 計算に成功し、粘土鉱物の摩擦挙動や流体輸

送特性の基礎を構築した。2010 年：中村らは、かんらん岩-水反応における化学輸送の素過程を高温高压実験によって調べ、従来考えられていたような結晶内拡散よりも、結晶粒成長・粒界移動に伴う溶解・析出作用が支配的であることを明らかにした。2009 年：武井は、粒界接触度に基づく固液二相系の粘性構成則を構築した。河村と市川は、粘土鉱物に富む媒体の中の水の輸送現象の均質化法によるシミュレーション法を開発した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 86 件)

- 1) Uehara, S., M. Takahashi, Evolution of permeability and microstructure of shear zone in Neogene siliceous mudstone, J. Struct. Geol., 60, 46-54, doi: 10.1016/j.jsg.2013.12.003, 2014. (査読有)
- 2) Shimizu, I., Rheological profile across the NE Japan interplate megathrust in the source region of the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquake, Earth Planets Space, 66, 66-73, doi: 10.1186/1880-5981-66-73, 2014. (査読有)
- 3) Watanabe T. and Higuchi A., A new apparatus for measuring elastic wave velocity and electrical conductivity of fluid-saturated rocks at various confining and pore-fluid pressures, Geofluids, 14, 372-378, doi: 10.1111/gfl.12050, 2014. (査読有)
- 4) Watanabe, T., Y. Shirasugi, K. Michibayashi, A new calculation method for calculating seismic velocities in rocks containing strongly dimensionally anisotropic mineral grains and its application to antigorite-bearing serpentinite mylonites, Earth Planet. Sci. Lett., 391, 24-35, doi: 10.1016/j.epsl.2014.01.025, 2014. (査読有)
- 5) Okumura, S., Nakamura, M., Uesugi, K., Nakano, T., Fujioka, T., Coupled effect of magma degassing and rheology on silicic volcanism, Earth and Planetary Science Letters, 362, 163-170, doi:10.1016/j.epsl.2012.11.056, 2013. (査読有)
- 6) Yoshimura, S., Nakamura, M., Flux of volcanic CO_2 emission estimated from melt inclusions and fluid transport modelling, Earth and Planetary Science Letters, 361, 497-503, doi:10.1016/j.epsl.2012.11.020, 2013. (査読有)
- 7) Selvadurai, A.P.S., Ichikawa, Y., Some aspects of air-entrainment on decay rates

in hydraulic pulse tests, *Engineering Geology*, 165, 38-45, doi:10.1016/j.enggeo.2013.05.023, 2013. (査読有)

8) Y. Takei and R. F. Katz, Consequences of viscous anisotropy in a deforming, two-phase aggregate. Part 1. Governing equations and linearized analysis, *Journal of Fluid Mechanics*, 734, 424-455, doi:10.1017/jfm.2013.482, 2013. (査読有)

9) Sakuma, H., Ichiki, M., Kawamura, K., Fuji-ta, K., Prediction of physical properties of water under extremely supercritical conditions: A molecular dynamics study, *J. Chem. Phys.*, 138, 134506, doi:10.1063/1.4798222, 2013. (査読有)

10) Kanzaki, M., Xue, X., Structural characterization of moganite-type ALPO4 by NMR and powder X-ray diffraction, *Inorg. Chem.*, 51, 6164-6172, doi:10.1021/ic300167k, 2012. (査読有)

11) Kawamoto, T., Kanzaki, M., Mibe, K., Matsukage, K.N., and Ono, S., Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 109, 18695-18700, doi: 10.1073/pnas.1207687109, 2012. (査読有)

12) Noritake, F., K. Kawamura, T. Yoshino and E. Takahashi, Molecular dynamics simulation and electrical conductivity measurement of Na₂₀·3SiO₂ melt under high pressure; relationship between its structure and properties *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 358, Issue 23, 2012, 3109-3118, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2012.08.027, 2012. (査読有)

13) Okumura, S., Nakamura, M., Nakano, T., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., Experimental constraints on permeable gas transport in crystalline silicic magmas, *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 164, 493-504, doi:10.1007/s00410-012-0750-8, 2012. (査読有)

14) Sakuma, H., Nakao, H., Yamasaki, Y., Kawamura, K., Structure of electrical double layer at mica/KI solution interface, *Journal of Applied Solution Chemistry and Modeling*, 1, 1-5, 2012. (査読有)

15) Yoshimura, S., M. Nakamura, Carbon dioxide transport in crustal magmatic systems, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 307, 470-478, doi:10.1016/j.epsl.2011.05.039, 2011. (査読有)

16) Takei, Y., K. Fujisawa, C. McCarthy, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 1. The apparatus, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2011JB008382, 2011. (査読有)

17) Sakuma, H., K. Kawamura, Structure and dynamics of water on Li⁺, Na⁺, K⁺, Cs⁺, H₃O⁺-exchanged muscovite surfaces: A molecular dynamics study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 63-81, doi:10.1021/jpl11936s, 2011. (査読有)

18) Watanabe, T., *Advances in Interpretation of Geological Processes*, in Spalla, M. I., Marotta, A. M. and Gosso, G. eds, *Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming halite rocks: inference from electrical resistivity*, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 332, 69-78, doi:10.1144/SP332.5, 2010. (査読有)

19) Ohuchi, T., M. Nakamura, K. Michibayashi, Effect of grain growth on cation exchange between dunite and fluid: implications for chemical homogenization in the upper mantle, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 160, 339-357, doi:10.1007/s00410-009-0481-7, 2010. (査読有)

20) Yoshimura, S., M. Nakamura, Chemically driven growth and resorption of bubbles in a multivolatile magmatic system, *Chem. Geol.*, 276, 18-28, doi:10.1016/j.chemgeo.2010.05.010, 2010. (査読有)

他66件

〔学会発表〕(計 205 件)

1) Nakamura, M., Okumura, S., Yoshida, T., Sasaki, O., Takahashi, E., *Geometry of intergranular fluids in the mantle xenoliths: Implications for the physical properties of fluid saturated upper mantle*, *Geofluid-3 (Invited)*, 2014年3月1日, Tokyo
2) Shimizu I., Rheological profile of the Tohoku-oki interplate megathrust across the source region of the M9 great Earthquake, *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting*, 2013年12月14日, San Francisco, USA

3) Miyazaki, T., Sueyoshi, K. and Hiraga T., Development of crystal preferred orientation of olivine during diffusion creep: a matter of olivine crystal shape, *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting*, 2013年12月11日, San Francisco, U.S.A

4) S. Uehara, M. Takahashi, Evolution of Permeability and Microstructure of Experimentally-Created Shear Zones in Neogene Siliceous Mudstones, *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting*, 2013年12月9日, San Francisco, USA

5) Tohru Watanabe, Motoki Kitano, A study on grain boundary brine in halite rocks using electrical conductivity measurements, *Deformation Mechanism*,

Rheology and Tectonics 2013, 2013 年 9 月 16 日, Leuven, Belgium

6) 清水以知子・上原真一・岡崎啓史・中谷正生, 蛇紋岩・タルクの摩擦特性にたいする間隙圧の影響, 日本地質学会, 2013 年 9 月 16 日, 仙台

7) 上原真一・清水以知子・岡崎啓史, 深部条件での岩石の摩擦特性における間隙圧の影響, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 23 日, 幕張

8) 神崎正美, Zn₂GeO₄ スピネル相と Zn₂SiO₄ 変形スピネル相の結晶構造, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 20 日, 幕張

9) Takei, Y., Experimental study on anelasticity of polycrystalline material for seismological application CIDER Workshop on Seismic Attenuation in the Earth's Mantle, Lamont-Doherty Earth Observatory, 2013 年 5 月 9 日, New York, USA

10) 清水以知子, 東北沖沈み込みプレート境界における間隙圧と断層強度, 地殻流体研究会 2013, 2013 年 3 月 2 日, ラフォーレ修善寺

11) 河村雄行・佐藤毅, 圧力・応力下でのスメクタイトの水和挙動・断層粘土と放射性廃棄物深地層処分の緩衝材, 地殻流体研究会 2013, 2013 年 3 月 2 日, ラフォーレ修善寺

12) 神崎正美・薛献宇, ケイ酸塩メルト中への水と二酸化炭素の溶解機構, 地殻流体研究会 2013, 2013 年 3 月 2 日, ラフォーレ修善寺

13) 市川康明・河村雄行, 沈み込み帯における粘土の挙動について—ナノ-ミクロ-マクロ解析—, 地殻流体研究会 2013 (招待講演), 2013 年 3 月 1 日, ラフォーレ修善寺

14) Hiraga, T., Miyazaki, T., Tasaka, M., Sueyoshi, K., Nakakoji, T., Koizumi, S., Yoshida, H., Atmospheric pressure creep experiments using highly dense fine-grained mineral aggregates, American Geophysical Union, 2012 年 12 月 5 日, San Francisco, USA

15) 河村雄行・佐久間博, 角閃石表面間の薄膜水の物性, 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012 年 9 月 20 日, 京都大学

16) Watanabe, T., Shirasugi Y. and Michibayashi K., Calculation of seismic velocity in serpentinites: importance of grain shape of antigorite, Serpentine Days, 2012 年 9 月 4 日, Hyeres, FRA

17) Watanabe, T., Shirasugi Y. and Michibayashi K., Calculation of seismic velocity in serpentinites: importance of grain shape of antigorite, 34th International Geological Congress, 2012 年 8 月 6 日, Brisbane, AUS

18) 上原真一・清水以知子・岡崎啓史, タルクの摩擦特性における間隙水圧の影響,

日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 22 日, 幕張

19) 平賀岳彦・宮崎智詞・田阪美樹・吉田英弘, マイロナイトにおける鉱物粒の衝突・合体とゼナーピンニング, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 22 日, 幕張

20) 柄澤史也・武井康子, 岩石のアナログ物質を用いた地震波減衰の実験: より低温・高周波を目指して, 2012 年 5 月 22 日, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張

21) M. Nakamura, Aqueous fluid connectivity in the crustal rocks: a microstructural perspective (invited), Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluid-2, 2012 年 3 月 20 日, 鳥取県三朝町

22) T. Watanabe, Geometry of intercrystalline brine in plastically deforming halite rocks: inference from electrical resistivity (invited), Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluid-2, 2012 年 3 月 20 日, 鳥取県三朝町

23) Y. Takei, C. McCarthy, F. Karasawa, Anelasticity of polycrystalline material over a broad frequency range (invited), Joint Symposium of Misasa-2012 and Geofluid-2, 2012 年 3 月 19 日, 鳥取県三朝町

24) M. Nakamura, Masamichi Abe, Fluid distribution in amphibolitic lower crust: Experimental constraints, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011 年 12 月 9 日, San Francisco, USA

25) T. Watanabe, M. Kitano, Fluid Distribution in Synthetic Wet Halite Rocks: Inference from Measured Elastic Wave Velocity and Electrical Conductivity, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011 年 12 月 8 日, San Francisco, USA

26) Takehiko Hiraga, Tomonori Miyazaki, Miki Tasaka, Hidehiro Yoshida, Comparison of microstructure of superplastically deformed synthetic materials and ultramylonite: Coalescence of secondary mineral grains via grain boundary sliding (Invited), American Geophysical Union Fall Meeting, 2011 年 12 月 6 日, San Francisco, USA.

27) 上原真一, 高橋美紀, 新第三紀珪質泥岩中に発達する断層の内部構造と透水特性: 室内実験によるアプローチ, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張

28) Takei, Y., Hiraga T., Experimentally determined anelastic and plastic behaviors of melt-free and melt-bearing Earth analogue materials: implications for grain and phase boundary dynamics (Invited), American Geophysical Union Fall Meeting, 2010 年 12 月 17 日, San Francisco, USA

29) Hiraga, T., Miyazaki, T., Tasaka, M., Yoshida, H., Mantle superplasticity a

nd dynamic grain growth, Americal Geophysical Union Fall Meeting, 2010年12月17日, San Francisco, USA

30) Watanabe, T., Urakawa, S., Kikegawa, T., Equation of State of Antigorite at High Pressure and Temperature, America l Geophysical Union Fall Meeting, 2010年12月15日, San Francisco, USA

31) 渡辺了, 蛇紋岩化したマントルの地震学的イメージ(招待講演), 日本地質学会, 2010年9月19日, 富山

32) 清水以知子, 渡邊悠太, 道林克禎, 高温高压変形実験による含水石英岩のレオロジー解明, 日本地質学会, 2010年9月18日, 富山

33) 上原真一, 高橋美紀, 増田幸治, シール層中の亀裂透水性: 深部条件下での新第三紀泥質岩中の亀裂透水性の推定, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 26 日, 幕張

34) 神崎正美, 地殻流体の角度分散ブリルアン散乱測定法の開発, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 25 日, 幕張

35) Watanabe, T., Shirasugi, Y., Yano, H., Michibayashi, K., Development of seismic anisotropy during serpentinization, Americal Geophysical Union Fall Meeting, 2009年12月16日, San Francisco, USA

36) Kawamura, K., Molecular dynamics simulations of water, solution, and clay mineral-water systems (Invited), Americal Geophysical Union Fall Meeting, 2009年12月15日, San Francisco, USA

37) Hiraga, T., Tachibana, C., Ohashi, N., Sano, S., Grain growth systematics for forsterite ± enstatite aggregates, Americal Geophysical Union Fall Meeting, 2009年12月15日, San Francisco, USA

他168件

〔図書〕(計 5 件)

- 1) 河村雄行(分担執筆), アクチノイド物性研究のための計算科学入門(小無健司・湊和生 編), 一般社団法人 日本原子力学会, 2013.
- 2) Takei, Y., Physics and Chemistry of the Deep Earth, WILEY BLACK WELL, 2013
- 3) Ichikawa, Y., Selvadurai, P., Transport Phenomena in Porous Media: Aspects of Micro/Macro behavior, Springer-Verlag, 2012.
- 4) Shimizu, I., Steady-state grain size in dynamic recrystallization of minerals, in "Recrystallization", Krzysztow Sztwiertnia Ed., p.371-386 ISBN 979-953-307-346-9, InTech Open Access Publ., 2012
- 5) 中村美千彦(井田喜明・谷口宏充編), 火山爆発に迫るー噴火メカニズムの解明と火山災害の軽減(分担執筆, 2.3章), 東大出版会, 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 美千彦 (NAKAMURA MICHIIHIKO)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70260528

(2) 研究分担者

河村 雄行 (KAWAMURA KATSUYUKI)
岡山大学・環境生命科学研究科・教授
研究者番号: 00126038

平賀 岳彦 (HIRAGA TAKEHIKO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 10444077

上原 真一 (UEHARA SHINICHI)
東邦大学・理学部・准教授
研究者番号: 20378813

竹内 康明(市川康明) (ICHIKAWA YASUAKI)
岡山大学・環境生命科学研究科・教授
研究者番号: 30126833

渡邊 了 (WATANABE TOHRU)
富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授
研究者番号: 30262497

武井 康子 (TAKEI YASUKO)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 30323653

清水 以知子 (SHIMIZU ICHIKO)
東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号: 40211966

神崎 正美 (KANZAKI MASAMI)
岡山大学・地球物質科学研究センター・教授
研究者番号: 90234153