

2 (4) 地震発生・火山噴火素過程

「地震発生・火山噴火素過程」研究推進部会長 矢部康男
(東北大学大学院理学研究科)

「地震発生・火山噴火素過程」研究推進部会委員 寅丸敦志
(九州大学大学院理学研究院)

地震発生の素過程については、より信頼性の高い地震発生モデルを構築するために必要な、地震発生の各過程を支配する破壊・摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。観測可能量から地震発生場の環境を精度よく推定するために、岩石物性の環境依存性を明らかにすることを旨とした実験・計測をおこなった。時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を検討するために、摩擦・破壊現象の規模依存性を明らかにするための実験・観測を行った。

火山噴火の素過程については、次の研究を個別に行った。東北大学では「浅部火山性流体挙動の理論的・実験的研究」[課題番号：1216]において、1) 物質学的アプローチによる火山性流体挙動の研究、2) 開口型火道内におけるマグマ上昇過程および気泡上昇による山体変形のモデリング、および3) 固液二相系における振動現象のモデリング、を行った。東京大学地震研究所では「爆発的噴火におけるマグマと波動の放出素過程に関する研究」[課題番号：1429]において、1) 爆発的噴火におけるマグマ破碎機構の研究、2) 火山の空振発生メカニズムを理解するための実験研究、3) 火山の空振観測、4) 空振 - 地震統合解析、さらに「噴火に伴うマグマ中の揮発性成分変化に関する研究」[課題番号：1430]として、ガラス包有物の揮発性成分分析法の確立を行った。九州大学では「マグマの発泡過程に注目した噴火履歴・多様性・推移の定量的把握と支配要因の特定」[課題番号：2206]として、1) 火山噴火のアナログ系としての間欠泉実験、2) 特定の火山噴火の噴出物についての分析、3) 発泡カイネティクスを含む気液 2 相流の火道内非定常モデルの定式化を行った。これらは、素過程に関する多種多様な側面を研究対象としているが、予知研究における素過程の役割の観点から次の三つのカテゴリーに整理される。

ア. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(岩石-水相互作用)

地殻流体としてより現実的な組成である 1 モル NaCl 溶液への石英と珪灰石の溶解度を、圧力 100MPa、温度 300°C あるいは 400°C、500°C という熱水環境で測定し、同溶液の有効誘電率を見積もった。1 モル NaCl 溶液の有効誘電率は、500°C では純水と同程度であるが、400°C で 20% 程度、300°C で 36% 程度、純水よりも高かった。これは、低温ほど、塩水と純水の誘電率が乖離するという予想と一致する。一方で、室温では純水を下回ることが知られているので、塩水の誘電率の温度依存性は、300°C 以下のどこかに変曲点を有することが予想される。誘電率の温度依存性の変曲点では、温度の低下に伴って鉱物の溶解度が急減する。そのため、この成果は、石英や珪灰石に飽和した塩水が地殻内を上昇する場合、温度が 300°C を下回る深度で急速に析出が生じて透水率が著しく低下すること、すなわち、断層バルブ (例えば、Sibson *et al.*, 1988) が形成されることの理論的必然性を示唆する (東北大学 [課題番号：1214])。

理論的検証と平行して、断層バルブモデルの実験的検証も行った。シリカに過飽和な超臨界水をステンレス管に流してシリカ鉱物を析出させ、流路を閉塞させた。析出するシリカ鉱物は、シリカの過飽和度と溶液中の不純分の濃度に依存していることが明らかとなり、その析出速度を定式化するこ

とが出来た (Saisyu *et al.*, 2010)。これは、Rimstid and Barnes (1980)によるシリカ鉱物の析出速度式を 30 年ぶりに改訂する成果である。実験中、シリカ鉱物の析出等による流路の閉塞に伴う流体圧の上昇と、流路の再開に伴う流体圧の減少が観察された。流体圧の上昇-下降のサイクルには、特徴的時間が数時間のもの数分間のものがあった。前者は、シリカ鉱物の析出という化学的過程による流路の閉塞、後者は破碎したシリカ鉱物が引っかかるという物理的過程による流路の閉塞によって引き起こされたと考えられる。化学的過程による流路閉塞と物理的過程による流路閉塞で、圧力変動の特徴的時間が著しく異なることは興味深い (東北大学 [課題番号: 1214])。

(下部地殻のレオロジー)

水を含んだ下部地殻の変形特性を明らかにするために、固体圧試験機により、温度 900 °C、封圧 1 GPa のもとで、無水の人工アノーサイト多結晶体に最大 0.5 wt%の水を添加して剪断変形実験を行った。多結晶体の平均粒径は 3 μm で、5 vol%のシリカリッチなメルトを含む。ドライ (無水試料そのまま) 及び 0.1-0.3wt%の水を加えた試料を、剪断ひずみ速度約 $10^{-4}/\text{s}$ で変形させた実験では差応力は最大で 1 GPa に達した。一方、0.5 wt%の水を加えた試料は顕著な弱を示した。回収試料の微細組織観察からは、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、歪の局所化も認められた。赤外分光法面分析から、0.1 wt%の水を加えて破碎流動が卓越した試料の局所含水量は最大でも 130 ppmH₂O であった。一方、0.5 wt%の水を添加した試料では、剪断歪が局所化している領域には最大 550 ppmH₂O の水が含まれていたが、破碎が生じている領域の局所含水量は 250 ppmH₂O 程度であった。このように、同一試料内においても含水量の不均質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。このことから、天然の断層帯においても水の非平衡拡散に伴う変形の不均質が生じている可能性がある (東北大学 [課題番号: 1214])。

フィリピン海プレートの地殻下部物質が露出しているフィリピン海パレスベラ海盆のゴジラメガムリオンから採取した塩基性岩と超塩基性岩の構造岩石学的な特徴を明らかにした (Harigane *et al.*, 2010)。塩基性岩の大部分は無水ハンレイ岩ではなく、角閃石ハンレイ岩ないし角閃岩であった。角閃岩は、強く剪断変形したマイロナイトを含む岩石であり、含水鉱物である角閃石に強い結晶方位異方性が発達していることがわかった。また、海洋底風化作用によって著しく風化した蛇紋岩化したカンラン岩の微細構造解析から、フィリピン海プレートマントル最上部の構造と変形の局在化を明らかにした (東京大学地震研究所・静岡大学 [課題番号: 1427])。

極細粒高緻密多結晶体の超塑性変形により、最大 500%の伸び変形をした試料の微細構造解析を行ったところ、多結晶体の粒径が、試料の変形 (ひずみ量) とともに増加することが明らかになった。実験によりえられた粒径-ひずみの関係から、断層深部延長でせん断ひずみが約 15 より大きくなると、もはや超塑性は発現せず、変形のメカニズムが転位クリープに遷移することが予想される (Hiraga *et al.*, 2010) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

比較的低温でも脆性-塑性遷移領域が現れる蛇紋岩を用いて、高温高压下でのレオロジーを明らかにし、蛇紋岩の摩擦構成則パラメタのマッピングを完成させた (産業技術総合研究所 [課題番号: 5010])。

(ガウジの挙動)

ガウジ層を有する模擬断層の三軸圧縮試験を系統的に行い、固着-すべりの核形成時にガウジ層が数%膨張することを確認した。このことは、固着-すべりの核形成が、ガウジ層内のリーデルシアに沿ったすべりによって引き起こされるとする仮説を裏付ける（東北大学 [課題番号：1215]）。

化学反応を起こしにくいガラスビーズを用いたリング剪断試験により、ガウジ粒子同士の衝突によるエネルギー散逸が摩擦強度に及ぼす影響を明らかにした。低速域では、ビーズ表面の凝着力のため、伝統的な摩擦則に従う振る舞いが見られたが、運動エネルギーが表面エネルギーよりも優勢となる高速摩擦では、多体系数値シミュレーション (Hatano, 2010a) と整合する、著しい速度強化が見られた。粒径や垂直応力に対する摩擦強度の依存性もシミュレーションの予測とよく一致していた。また、高速域でのみ、ガウジ層の著しい膨張が観察された。これは、高速域での著しい速度強化が、粒子の集団ダイナミクスの結果であるというシミュレーションの考察を強く支持する。さらに、シミュレーションでは、高速域で剪断速度を変化させた時の摩擦抵抗の変化は、低速域で見られるような特徴的すべり距離ではなく、特徴的時間で規定されることが示された (Hatano, 2010b)。このことは、自然地震で推定される D_c が地震の規模とともに大きくなることに対してひとつの説明を与える可能性がある。さらに、ガウジ層を厚くした実験では、 D_c は 10 m を超える大きな値を示した。すべり速度を階段状に増加した場合と減少させた場合で対称な応答を示したことから、このような長大な D_c は、粒子自体の物性変化ではなく、多体粒子系の構造変化によって生じている可能性が高い（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

（断層破砕帯の成因）

San Andreas 断層などの大規模横ずれ断層帯のダメージゾーンには、顕著な剪断組織は持たないが著しく粉砕した岩石 (Pulverized rocks) が広く分布することが知られている。この岩石の分布が、断層に沿って非対称であることなどから、破壊伝播に伴う動的応力場によって形成された可能性が指摘されているが、その正確な形成機構は明らかではない。Pulverized rocks の形成機構を明らかにするために、San Andreas 断層および有馬高槻構造線の地質調査を行い、両断層沿いで採取した Pulverized rocks の微細組織観察を行った。Pulverized rocks の粒径分布は、通常の断層ガウジやカタクラサイトに比べ、高いフラクタル次元と大きなカットオフ粒径を示した。このことは、摩擦によって細粒物質が形成され、徐々に断層破砕帯が出来るという従来の理論では説明できないことから、新たな断層形成機構の存在を示唆する（東北大学 [課題番号：1215]）。

（中速・高速摩擦特性）

アラスカのコディアックメランジで採取した付加体泥岩を用いて中・高速摩擦実験を行った。垂直応力 1 MPa では、泥岩ガウジの摩擦強度が増加するのに伴ってガウジ層の膨張が認められた。垂直応力を低下させると、摩擦強度の増加やガウジ層の膨張の程度も小さくなり、垂直応力 0.4 MPa では、いずれも認められなくなった（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

非晶質含有量が 0-40wt% の範囲に収まるよう粉砕法によって作成したドレライトガウジを用いた摩擦実験を、広い速度範囲で系統的に行った。まず、広島大学の二軸試験機により、室温及び 120°C の温度下において、2-20 $\mu\text{m/s}$ の低速で速度ステップ実験をおこなった。いずれにおいても定常摩擦の速度依存性はわずかに速度弱化であったが、20 mm 程度の累積変位の間にみられた摩擦のすべり変位依存性には非晶質の含有量による違いがあった。室温では、非晶質分が少ない時にはすべり弱化、多い時にはすべり強化が生じた。一方、120°C の実験では、非晶質分の量にかかわらず摩擦係数は一定のままであった。このような違いは、非晶質への水の吸着が環境温度に依存することによると考え

られる。産業技術総合研究所の回転式試験機により、室温下で、広い速度範囲（20 $\mu\text{m/s}$ -1.3 m/s）の実験を行ったところ、4 cm/s 以上の高速すべりでは非晶質の量に依らず非常に顕著な速度弱化を示した。一方、低速すべりでは、非晶質が多い試料ほど大きな摩擦強度を示した。この傾向も、二軸実験の場合と同じく、非晶質に対する水の吸着と温度（この場合は摩擦発熱）による逸失という解釈が可能である（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

（摩擦の微視的過程）

摩擦面上の真実接触部の静的挙動を調べるため、石英の表面（c 軸に垂直）に超微小硬度計を用いて圧痕を作り、その周りでレーザーラマン分光装置を用いてラマンシフトを検出した。石英の代表的ピークである 464 カイザーのシフトをマッピングしたところ、圧痕中心部付近で2つにスプリットしていることが明らかになった。短波長側へのピークのシフト量を圧力に換算すると、最大で 2 GPa 以上の圧力が圧痕中心部の非常に狭い部分にかかっていたことが推定される。また、長波長側へシフトしたピークの強度分布からは、圧痕の辺の部分に高い圧力がかかっていることや、頂部の外側が引っ張り場（マイナスのシフト）になっていることが認められた。さらに、圧痕の形成に要するエネルギーの結晶方位依存性や接触部形状の効果を調べるため、石英単結晶試料の方位を変え、5 種類の圧子を用いて試した。その結果、結晶方位によらず、各圧子のデータは圧子の形状に固有の直線に分布したが、直線の傾きは圧子の種類にかかわらずほぼ同じであった（静岡大学 [課題番号：2910]、東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

真実接触部の微視的クリープ変形過程に基づく理論的考察により、岩石の準静的な摩擦特性を記述する巨視的経験則である速度・状態依存摩擦則に含まれるパラメータや状態変数の微視的表現を確立し、それらの物理的な意味を明らかにした。これにより、室内実験で得られた知見を地震発生場の理解に適用する上で重要な、摩擦現象のスケールリングを支配する臨界すべり量の微視的表現が初めて得られたことは特筆される（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

摩擦に伴う石英岩が非晶質化すると含水したゲルが生じて、低速-中速すべりにおいても、すべり弱化や速度弱化を引き起こす。このゲルの生成にかかわる物理化学的過程を明らかにするため、Pin-on-disk 型の摩擦試験機を用いて、摩擦すべり面に形成される石英トラックのラマン分光分析を行った。その結果、本来、 SiO_4 四面体 6 員環からなる石英構造中に、3-4 員環という歪んだネットワーク構造が見いだされた。このことから、真実接点での高応力により SiO_4 中距離構造がより歪んだ平面 3 員環ないし 4 員環となり、歪んだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進むことで、摩擦すべり面に非晶質シリカの水和物（ゲル）が生成されたことを示唆する。そして、非晶質シリカ水和物が強度の低い粘性物質として振舞うことで速度弱化を引き起こす考えられる（東北大学 [課題番号：1215]）。

断層ですべりが生じるためには、断層面上の真実接触部を破壊する必要がある。真実接触部の破壊は、クリープのような塑性変形だけではなく、弾性波の放射を伴う脆性過程も伴っていることが、摩擦すべりに伴う微小破壊振動（AE）の計測により明らかになった。AE 活動の振幅別頻度分布を特徴づける m 値や単位すべり距離当たりの AE 発生数はすべり速度に依存し、摩擦強度のすべり速度依存性と一定の相関を示した。このことは、地震活動や地殻変動のような既存データを利用して、プレート境界面上の摩擦特性分布を推定しうることを示唆する（東北大学 [課題番号：1215]）。

（透過弾性波による断層面モニタリング）

断層面透過波振幅から推定した断層面接触状態の物理的意味づけを明らかにするため、アクリル

樹脂を用いたすべり実験を行い、光学的に計測された真実接触面積と音波透過率の比較を行った。その結果、両者の関係は、すべり速度ごとに異なる線形関係に従い、音波透過率から真実接触面積を一意に推定できるわけではないことが明らかとなった。これは、音波透過率が単に接触面積だけではなく、接触部の大きさ分布にも依存するためと考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。さらに、静的接触時間の増加に伴う断層面強度回復の不均質性を明らかにするために、受信子を面的に配置して音波透過率の時間変化を計測した。接触開始直後の初期音波透過率は、断層面形状の凸部同士が接触している場所で大きい傾向があった。音波透過率は接触時間の対数に比例して増加するが、初期透過率が大きいほどその増加率が大きいことが明らかとなった。このことは、接触時間の増加とともに強度の不均質が強くなることを示唆しており、地震学的アスペリティの形成を考えるうえで重要な知見である（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

三軸圧縮破壊実験での断層面形成に伴う弾性波透過率の変化を定量的に評価するため、計測に用いた広帯域圧電センサーの検定を行った。検定結果に基づいて、200 kHz～1 MHz の帯域での減衰パラメータ Q 値を求めたところ、ダイラタンシーが起きるまでは $Q \sim 23$ で一定であるが、ダイラタンシー開始とともに減少し、試料の降伏時では $Q \sim 17.5$ であった。降伏荷重以降は、それ以前に比べて、初動振幅の減少率が増加したが、 Q 値にはそのような急激な変化は見られなかった（Yoshimitsu and Kawakata, 2011）。試験後に回収された試料の X 線 CT 解析によりえられた断層等の構造が、弾性波速度不均質としてどのように見えるのかを明らかにするため、弾性波速度トモグラフィ解析を行った。観測できる周波数帯の制約により、弾性波速度トモグラフィの分解能は 10 mm 程度と粗いものの、推定された低速度域の分布は、X 線 CT で捉えた断層の分布と概ね一致していた（立命館大学 [課題番号：2909]）。

イ. 地殻・上部マントルの物性の環境依存性

（蛇紋岩の物性・変形過程）

巨大地震の発生を含む、沈み込み過程に重要な役割を果たしている蛇紋岩の分布を地震波速度の不均質構造にもとづいて把握するためには、蛇紋岩の弾性的性質を正しく理解することが不可欠である。蛇紋岩は、アンチゴライトのような弾性的異方性の強い鉱物を含むので、その平均的な弾性定数を Voigt 平均や Reuss 平均といった従来の手法で精度よく見積もるのは困難である。例えば、アンチゴライトのみからなり、結晶方位がランダムで、巨視的には等方的な蛇紋岩では、Voigt 平均と Reuss 平均の間には P 波速度、S 波速度ともに 1 km/s ほどの差が生じる。これは、アンチゴライトの粒子形状が考慮されていないためである。そこで、粒子形状を考慮した計算手法を拡張し、等方的な蛇紋岩の弾性波速度（常温、常圧）をより精度よく推定する手法を開発した。この手法で推定された P 波速度は 6.70 km/s、S 波速度は 3.78 km/s であり、これから得られる V_p/V_s は 1.77 である。これは、実測値の 1.8 とほぼ一致する。この結果を地震波速度トモグラフィの解釈に応用すると、紀伊半島下のウェッジマントルなどで得られている 1.8 を超える V_p/V_s は蛇紋岩化だけでは説明できず、流体の存在を仮定する必要があるといえる（東京大学地震研究所 [課題番号：1428]）。

（下部地殻・マントルのせん断変形メカニズム）

多相系岩石の強度は、地震発生に重要なせん断集中帯の強度やその進化を理解するために重要であるが、構成鉱物間の物理・化学相互作用にも依存するため、岩石を構成する主要鉱物単相の試料を用いた流動実験の結果から推定するのは困難である。そこで、せん断帯で見られる拡散クリープ条件下での二相系の変形実験により、第二相（相対的に少ない相）粒子が試料の変形特性に与える影響を調

べた。フォステライト-エンスタタイト系の粒成長実験では、粒径が第二相の量比、界面エネルギー、Siの拡散係数、成長時間、ひずみに依存することが明らかになった。また、二相系の量比と共に系統的に変化する粒径を持つこのような多結晶体の粘性は、粒径と相の強度で決定されることも明らかになった。さらに、観察された強度変化は、ひずみ速度一定モデルでうまく説明できることが分かった。これらのことから、上部マントルでのせん断変形集中は、著しい粒径変化によって強度構造が進化するためであると理解できる。一方、合成細粒試料の圧縮・引張実験で見いだされた、マイロナイトと類似した第二相粒子の衝突合体組織は、同じ試料を用いてミネソタ大と共同で行ったねじりせん断試験でも再現され、超塑性的な粒界すべり変形がせん断帯で普遍的に発生することが示唆された（東京大学地震研究所〔課題番号：1427〕）。

地殻の脆性-塑性遷移領域の上部に接する脆性領域と下部に接する塑性領域にそれぞれ分布する断層岩を特定した。脆性領域では転位クリープや粒界すべりといった塑性変形機構が卓越するのに対し、塑性領域では圧力溶解クリープを伴う摩擦すべりが卓越することが示唆された（産業技術総合研究所〔課題番号：5010〕）。

オマーンオフィオライト延性剪断帯の微細構造解析を行い、せん断変形帯が地震発生に果たす役割を検討した。オマーンオフィオライト北部フィズ岩体には、海洋地殻およびその下部のマントル物質を横切る大規模な延性剪断帯が露出している。この剪断帯では、特に地殻-マントル境界において角閃石が高い頻度で見出される。角閃石は、母岩であるハンレイ岩に水が作用して形成されるので、海洋地殻-マントルを横切る延性剪断帯がマントルからの水みちとして機能していた可能性が高い（東京大学地震研究所〔課題番号：1428〕）。

（流動則の高精度推定）

天然の条件に比べて高温・高ひずみ速度（高応力）の実験で得られる鉱物の流動則を外挿して地球内部の流動変形に適用するためには、活性化エネルギーをはじめとした流動則のパラメタを高い精度で計測する必要がある。そこで、フォステライト多結晶体の一軸圧縮クリープ試験を高温・大気圧下で行い、流動応力の温度依存性を明らかにした。また、インピーダンス法により、クリープ試験中に電気伝導度を測定した。一般に、最も遅いイオン種の拡散過程がクリープを律速し、最も速いイオン種の拡散過程が電気伝導度を律速すると考えられているので、クリープ速度と電気伝導度のそれぞれの温度依存性（活性化エネルギー）を高精度で求めることにより、拡散メカニズムの詳細を理解できると期待される。この結果に基づいて、地球内部の流動変形における律速過程を推定できれば、より高い信頼度で、実験室で得られる流動則（活性化エネルギー）を地球内部に適用することができる。試料は、90vol%のフォステライト（ Mg_2SiO_4 ）と10vol%のエンスタタイト（ $MgSiO_3$ ）から成る多結晶焼結体である。実験中の粒径変化を抑えるため、あらかじめ実験を行う最高温度まで昇温し、粒径を飽和させた。試験中は応力を10-20 MPaで一定に保ち、温度は1360°Cから1200°Cまでゆっくり変化させた。これにより、1°C刻みで応力-ひずみ速度の関係を得ると同時に、ピストンと試料の接触部である上部および下部のSiCを電極として印加した2Vの交流電圧と応答電流の関係から試料のインピーダンスを10°C毎に測定した。全温度領域の粘性率・温度のアレニウスプロットにおいて、両者の関係は、非常に小さなばらつきでひとつの直線にのることが分かった。このことは、実験を行った温度領域では律速する拡散機構が変わらなかったことを示す。また、このプロットから活性化エネルギーを 722 ± 1 kJ/molという高い精度で推定することができた。これは、本実験手法によって、地球内部の低温領域に安定して外挿できる流動則を得られることを示している。インピーダンス測定からは、温度の低下に伴い電気伝導度が系統的に小さくなることが示された（東京大学地震研究所〔課

題番号：1428])。

(地震波の減衰)

地震波速度の3次元不均質構造から地球内部の温度分布や流体分布を定量的に推定するためには、岩石の非弾性特性の解明が不可欠である。岩石のアナログ物質として有機多結晶体を用いて、試料のヤング率 E と減衰 Q を幅広い周波数 (10-0.1 mHz) で精密に測定できる強制振動型変形実験装置を開発した。この実験で、減衰スペクトル $Q(f)$ の温度 T 、粒径 d 、メルト分率 ϕ に対する依存性に相似則が存在し、マックスウエル周波数 $f_M(T, d, \phi)$ を用いて $Q(f, T, d, \phi) = Q(f/f_M)$ と表せることが分かった。同様の相似則がオリビン多結晶体でも成り立ち、 $Q(f/f_M)$ がアナログ物質と同一の曲線で表せることから、多結晶体の非弾性の持つ普遍性を明らかにすることができた。しかし、マンツルのマックスウエル周波数で規格化した地震波の周波数は、実験データがカバーしている帯域よりも2桁程度高いことも分かった。そこで実験法を改良して、より高周波、低温領域でアナログ試料の非弾性データを取得し、 $f/f_M=10^7$ までの高規格化周波数領域で非弾性データを取得した。これまでに得られた実験データは、高い規格化周波数帯域では、マックスウエル周波数を用いた単純な相似則が成り立たないことを示唆する (東京大学地震研究所 [課題番号：1428])。

ウ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

(断層摩擦のスケーリング)

室内実験結果を外挿して地震発生過程を理解するためには、室内で計測される断層の強度や破損過程が、断層の大きさに対してどのようにスケールされるのかを知る必要がある。例えば、地震断層の動摩擦は、実験室で計測されるよりずっと低い可能性がしばしば指摘されている。これは、摩擦の古典的理論である凝着摩擦説の予想に反して、摩擦強度がスケール依存性を持つことを示唆するが、その指摘の根拠となるデータは間接的なものであり、地震断層の強度を直接計測した例はほとんどない。南アフリカの大深度鉱山において、 $M_w 2.2$ の地震が発生した断層を貫通する掘削を行った。孔壁やコア試料の観察から明らかになったボアホールブレイクアウトやディスクキングの分布と、室内実験で計測したコア試料の強度から、震源域における応力状態を推定した。その結果、震源断層に作用する法線応力に対するせん断応力の比は0.6-0.8で、多くの室内実験で計測されている摩擦係数と一致した。このことは、摩擦強度はスケール依存性を持たないことを示唆する (東北大学 [課題番号:1215])。

大型振動台を載荷装置とし、0.5 m×1.5 m の断層に1.3 MPaの法線応力を印加した二軸すべり摩擦実験を行った。すべり速度0.1-10 mm/sでは、小サンプルを用いた従来の実験結果と同程度の摩擦係数が得られた。また、動的すべりが試料端まで達しないstick-slip eventを多数観測する事ができた。このデータは、これまで十分に解明されていなかった断層破壊の停止機構に関して新たな知見をもたらすと期待される (防災科学技術研究所 [課題番号：3015])。

断層面の破壊エネルギーは、地震発生に先行する準静的震源核の大きさを規定することが理論的に知られている。Kato(2012)は、2次元での地震サイクルシミュレーションと破壊力学的考察から、繰り返し時間の長い地震ほど破壊開始点での破壊エネルギーが大きくなると予想した。経験的に、静的応力降下量が地震のサイズに依存しないので、繰り返し間隔と地震のサイズを一对一に対応付けることができる。そこで、アスペリティの破壊エネルギーがアスペリティの半径 (R) に依存しないという仮定で行った3次元地震サイクルシミュレーションでは、大きな地震ほど応力降下量が小さくなるという、経験則に反する結果が得られた。簡単な破壊力学的考察によると、破壊エネルギーが R に

比例すれば、応力降下量が一定となることが示される。そしてこのときには、震源核の半径が本震破壊の半径と比例することが期待される（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

Kato and Yoshida (2011)は、平成 23 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の数値シミュレーションを行い、M7 級地震を引き起こすアスペリティでは巨大地震の直後から固着が回復し、周囲で起こる余効すべりにより次の M7 級地震の発生が早められると予想した。しかし、最近の GPS データの解析によると、M7 級地震のアスペリティでは、東北地方太平洋沖地震発生から 1 年経っても固着が見られない。そこで、強度回復の物理化学過程に固有のカットオフタイムを数値シミュレーションに導入し、固着の開始がどのように遅れるかを調べた。室内実験ではカットオフタイムは 10 桁程度変わりうるということが知られているので様々なカットオフタイムを仮定した数値計算の結果、カットオフタイムを長くすれば固着の開始は遅れるが、同時に最大すべり速度も遅くなることが示された。地震性の高速すべりを起こせるような場合では、固着の開始を 1 ヶ月程度しか遅らせることはできなかった。摩擦強度の回復には、それぞれに固有の時定数をもつ様々な物理化学過程が関与しているので、異なるカットオフタイムを有する摩擦則を定式化し、更に検討を進めた。その結果、最大すべり速度は短い方のカットオフタイムで規定され、全体的な固着の遅れは長い方のカットオフタイムの影響を強く受けることが明らかになった。これにより、固着の開始を大幅に遅らせつつ、地震性すべりも再現することができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

（断層面形状の階層性）

断層面形状の本質的な不均質は、地震の多様性を生じる根源的な要因であると考えられる。断層面上のある点までの距離 x とその点における測度（例えば凹凸の振幅 h ）との間に $h = \beta x^H$ の関係がある場合、断層面形状はフラクタルであり、フラクタル次元 D は $D = E + 1 - H$ で表せる（ E はユークリッド次元、 H はハースト指数）。1 mm から 100 km スケールの断層の観察から、全ての断層帯が断層セグメントとジョグの階層的入れ子構造になっていて、① D は 2 よりわずかに大きく、② H は 1 よりわずかに小さく、③ β は約 0.04 であることが明らかになった。①と②の事実は地震学的な推定と調和する。③は本震と余震の震源断層の長さ比を説明する。地震発生層の厚さより長い横ずれ地震断層の地表平均変位 U は長さ L の 1 乗ではなく、約 0.46 乗に比例して増加する。これはジョグによるピン止めのためであると解釈することができる。Hillers and Wesnousky (2008)による数値実験はこれを再現している。Dieterich and Smith (2009)による数値実験は、 $H=1$ で β が約 0.04 のとき、 $U \propto L^{0.46}$ を再現する。すなわち、断層面の不均質性の実態は、階層的に自己相似な断層帯内部の幾何学的構造であると考えられる（東北大学 [課題番号：1215]）。

（室内実験で観測される AE のスケージング則）

試料表面に 7 台の広帯域トランスデューサ（感度帯域：100-2000 kHz）を貼付したウェスタリー花崗岩試料を用いて三軸圧縮破壊試験（封圧：10 MPa）を実施した。トランスデューサの出力は高速（20 MS/s）・高分解能（14 bit）でサンプリングされ、約 6 時間の実験を通じてほぼ連続で収録することができた。軸荷重がピーク強度（296 MPa）に達した後、約 24 MPa の応力低下を確認したところで高速除荷し、試料を回収した。X線 CT スキャンにより、回収後の試料内に明瞭な一枚の断層が成長途上であること確認した。集録された連続波形から微小破壊に伴う AE イベントを抽出し、震源決定をおこなった。AE の震源分布は、X線 CT スキャンで確認された断層と対応しており、その中に 2 つのクラスタが見つかった。トランスデューサの感度を校正し、2 つのクラスタに含まれる AE 波形のスペクトル解析を行った。AE の地震モーメントは Mw-8 から -7 程度に相当し、コーナー周波数との

関係は自然地震と同一のスケーリング則に従っていた。このことは、AE から自然地震に至るまで、震源サイズにして8桁程度にわたり、応力降下量が破壊規模に依存しない自己相似な関係にあることを示している（立命館大学〔課題番号：2402〕）。

（掘削試料の解析）

南海掘削の深さ約270 m でえられた2つの粘土質断層物質を用いた摩擦実験を行った。低速では、一方の試料は速度強化の摩擦特性を示し、他方は速度弱化を示した。しかし、中速摩擦実験では両者の挙動は、互いに、きわめて類似していた。これらのことから、低速すべりでは、粒径や組成、組織といった試料の個性が摩擦特性に影響を与えるが、中速ではその影響が消失することがわかった。その具体的なメカニズムはまだ不明だが、前述した粒子の集団ダイナミクスと関係しているのかもわからない（京都大学防災研究所〔課題番号：1814〕）。

南海掘削でえられた粘土質断層物質をガウジとして用いた別の実験では、組成や粒度がほぼ同じ試料でも、あるものはすべり速度弱化を示し、別のものはすべり速度強化を示す結果が得られた。実験後の組織観察からは、すべり速度弱化を示した試料では変形が、ガウジ層内のすべり面に局在しているのに対して、すべり速度強化を示した試料ではガウジ層全体が一様に変形していることが確かめられた（京都大学防災研究所〔課題番号：1814〕）。

回転式中-高速摩擦試験機を用いた実験では、統合国際深海掘削計画（IODP）Exp. 334により、中米海溝コスタリカ沖の沈み込みインプットサイト（Site U1381A）で採取されたココスプレート上の生物起源堆積物が、すべり速度が数十 mm/s より高速では摩擦係数が0.2以下に低下するという著しい速度弱化の性質を示すことが明らかになった（京都大学〔課題番号：1814〕）。

南海トラフ付加体浅部（海底下約1000-1500 m）から採取された砂岩、凝灰岩、シルト質泥岩および粘土質泥岩の4試料を用いた三軸摩擦実験により、鉱物組成が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにした。原位置に近い条件（室温、封圧36-58 MPa、間隙水圧28-43 MPa）のもと、軸方向の変位速度を0.1、1、10 $\mu\text{m/s}$ でステップ状に変化させたところ、摩擦係数は、粘土鉱物含有量が約5 wt%の砂岩試料で0.8より大きく、約15 wt%の凝灰岩試料、約30 wt%のシルト質泥岩試料、約40 wt%の粘土質泥岩試料ではそれぞれ約0.7、約0.53、約0.25であり、粘土鉱物含有量と負の相関を示した。また、砂岩試料、凝灰岩試料、シルト質泥岩試料、粘土質泥岩試料は順に、わずかにすべり硬化、ほぼ定常すべり、わずかにすべり軟化、明瞭なすべり軟化の挙動を示し、すべり距離依存性にも粘土鉱物含有量との相関が認められた。いずれの試料も速度強化の挙動を示したが、摩擦強度のすべり速度依存性にも粘土鉱物含有量との相関が認められ、粘土鉱物含有量が多くなると、すべり速度依存性に対する流動の影響が大きくなった（東京大学地震研究所〔課題番号：1427〕）。

中央構造線のボーリングコアに含まれる断層岩の解析から推定される、過去に被った最大差応力は、脆性-塑性遷移領域直上で100MPa未満、脆性-塑性遷移領域直下では200MPa程度であった（産業技術総合研究所〔課題番号：5010〕）。

（南アフリカ金鉱山での地震観測）

クック・フォー（旧名イズルウィニ）鉱山の深さ約1 kmで行っているAE観測では、ひと月あたり10万個程度のイベント波形が収録されている。合計10ヶ月間分のデータを用いて自動処理による震源決定をおこない、1,509,568個のイベントについて、P波走時の検測値が10個以上、走時残差のRMSが0.2 ms以下という基準を満たす信頼性の高い震源が求められた。これらのうち、90%以上は採掘前線域でのAE活動である。採掘前線域以外で発生するAEは20-100mの広がりをもつ、9枚の薄い

面状のクラスタに集中しており、そのうち3クラスタは鉱山会社から提供された地質図に記載されていた地質断層と一致した。既知の地質断層との対応がわかっていなかった2つのクラスタについても、その後の現地調査により、それらと対応する弱面が坑道で確認できた。これらの薄い面状クラスタで発生したAEの相対震源決定をおこなったところ、クラスタの厚さは薄いものでは50cm程度で、非常に密集した面状分布を示すことがわかった。いくつかのクラスタでは、面のオフセットやブランチなど、より細かな構造をAE分布から確認する事ができた。面状クラスタを構成するAEの99.8%はMw-2以下であり、通常の鉱山地震観測網（検知限界Mw-1程度）では検知できない。面状クラスタを構成するAEの規模分布はべき乗則に従っており、そのb値はクラスタ毎に異なっているが(1.34から2.19)、いずれにおいて、採掘前線域に分布するAEのb値(1.3程度)に比べて高い値を示した(立命館大学[課題番号:2402])。

エ. マグマの分化・発泡・脱ガス過程

(素過程に関係づけた観測量解釈の高度化)

桜島のブルカノ式噴火のように繰り返し噴火を行う噴火では、マグマの上昇から、噴火、マグマの後退といった一連の火道内過程と、地表での地殻変動の関係の確立が重要となる。これまで開口型火道内におけるマグマ上昇過程および気泡上昇による山体変形のモデリングの研究では、マグマの上昇期の地殻変動の特性を取り扱い、火道中のガスの挙動と地殻変動特性の関係を明らかにしてきた。本年度は、さらに進めてマグマ後退期の地殻変動特性の研究を行い、破碎面の降下速度の見積もりが可能であることを明らかにした。また、固液二相系における振動現象のモデリングの研究では、これまでの研究成果を用いて、阿蘇山・吾妻山・蔵王山・八甲田山といった活火山における長周期地震・単色地震の解析を行い、その振動力源の卓越成分は開口亀裂型の体積変化成分であることを明らかにした(東北大学[課題番号:1216])。

火山の空振観測においては、これまで行って来た研究成果をもとに、火山爆発による空振の特性を火口から数十km離れた観測点でも観測できるように、桜島火山を対象に1700回近くの爆発空振を解析し、空振伝播の時空間変動を明らかにするとともに、フィレンツェ大学や日本気象協会とも協力して、空振伝播に対する地形や大気構造の影響を評価する手法を提案した。また、新燃岳周辺の観測点での空振に対する地面の応答関数を計算し、その応答関数を用いて新燃岳2011年噴火における連続噴出に伴う空振と地震を解析した。その結果、地震、空振のエネルギーがともに、マグマだまりの体積収縮率と比例関係にある場合(2回目の準プリニー式)があることが分かった。(東京大学地震研究所[課題番号:1429])。

(噴火現象における素過程の役割と評価)

物質学的アプローチによる火山性流体挙動の研究では、これまでの発泡するマグマの変形過程のその場観察をさらに推し進め、せん断破壊領域までの実験を行った。その結果、破壊領域を介することで極めて効率的な脱ガスが起こることを示した。このことは、爆発的噴火と非爆発的噴火の遷移の要因を観測でとらえるために重要な示唆を与える。また、新燃岳2011年噴火における噴出物について、マイクロライトより小さくさらに数密度の大きいナノライトの解析から、噴火様式の推移とナノライトの鉱物組み合わせに相関があることがわかった(東北大学[課題番号:1216])。

火山噴火のアナログ系としての間欠泉実験の研究においては、噴火開始のためのトリガー条件、及びトリガー後の減圧発泡に関係する噴火ポテンシャルという概念を提出し、噴火の規模や様式、推移の支配要因として噴火直前のマグマだまり内部での揮発性成分濃度の不均一構造が重要であるこ

とを突き止めた。特定の火山の噴出物についての分析では、桜島大正噴火、始良カルデラ噴火、新燃岳 2011 年噴火を取り扱った。その結果、噴火様式やその推移は、マグマだまりの中ですでに決定されている可能性が大きいということがわかった。発泡のカイネティクスを含む気液 2 相流の火道内非定常モデルの定式化では、気泡の核形成・成長のカイネティクスを見通しよく組み込む定式化を行い、衝撃波管問題に応用し、定式化の数値的確認を行った。その結果、発泡のカイネティクスの火道流モデルへの組み込みは、圧力変動や遷移現象をモデル化し理解する際に本質的であることがわかった（九州大学大学院理学研究院[課題番号：2206]）。

（素過程データ抽出のための技術開発）

地下深部でのマグマ中に含まれている揮発性成分濃度について過去の噴火の噴出物のデータを蓄積しておくことは、噴火ポテンシャルの評価や、噴火様式と揮発性成分濃度の間の経験則の確立などの観点から重要である。揮発性成分として特に水に注目し、ガラス包有物中のデータについて統計的検討を可能にするために、顕微 FT-IR 反射分光法の技術開発を行い、流紋岩組成から玄武岩組成をカバーする測定技術をほぼ確立した。天然への応用として、富士火山宝永噴火の白色軽石に応用し、その他の手法による結果と合わせて、白色軽石のマグマだまりの存在条件として、圧力 100~150 MPa、深度 4~6 km と、初めて物質科学的制約を与えることに成功した（東京大学地震研究所[課題番号：1430]）。

これまでの課題と今後の展望

地震発生の素過程については、この 5 か年の研究により、断層摩擦や岩石 - 水相互作用、地殻・マントルのレオロジーに関する多くの知見が室内実験によって得られたが、多くの場合、試料寸法は限られており、実験条件（温度、圧力、間隙圧等）も地震発生場とは異なっている。そのため、実験でえられた知見を自然地震に適用するためには、一層の工夫が必要である。そのような試みの一つとして、露頭に現れたかつての下部地殻や上部マントルの微細構造の調査が行われた。さらに、大型の試料を用いた固着 - すべり実験や南アフリカ金鉱山での震源直近観測により、実験と観測のスケールギャップを埋める努力もなされている。一方で、シミュレーションや観測研究のグループとの対話が不足していたため、素過程研究の成果を地震発生予測の高度化に十分に生かすことができていなかった。この点をあらため、室内実験の成果を地震現象の理解や地震発生予測により効果的につなげるためには、実験により計測された物性値や観察により推定された環境条件を取り入れたシミュレーション研究グループに手渡して、その予測と観測結果を比較し、両者の食い違いを修正するために必要な実験デザインをフィードバックすることができるよう、各分野の研究者間の有機的なコミュニケーションネットワークを構築していく必要がある。次期建議に基づく研究計画の部会構成はこの方向に沿っており、素過程研究の成果還元を効果的に行うことができるようになると期待される。一方で、より高度な実験を行うためには、実験技術に関する情報交換やデータの精度や解釈に関する専門的な議論を行える場を確保することも重要である。企画部にはこの点に関する配慮をお願いしたい。

火山噴火の素過程は、現計画で初めて取り上げた課題である。当初の目的は、噴火の規模・様式・推移を支配する要因の特定や、現象のモデル化によって観測の意味づけを行い、予知の高度化に貢献することであった。このことに関しては、ある程度達成されたと考えられる。今後は、あまたある個別の現象の理解を深めるとともに、得られた研究成果をさらに発展させて、より実践的、より具体的な予知と推移予測への応用を目指していくことであろう。さらに、多数ある火山の個性を含むような普遍的法則性の確立へと向かうことが、あらゆる場合を科学的に想定可能にする噴火予知のための

戦略として必要である。しかし残念ながら、この素過程部会は次期計画にはそのまま継承されない。火山噴火に関する本部会の最大の貢献は、火山噴火予知の中に、理学的視点を持ち込んだことであり、この視点を今後も何らかの形で持ち合わせていくことが、今後の噴火予知の可能性と信頼性を発展させるために重要であろう。

成果リスト

- Araki, M. and A. Toramaru, 2013, Effect of seismic oscillation on the bubble detachment from wall of magma chamber, IAVCEI 2013 Scientific Assembly - July 20 - 24, Kagoshima, Japan, 1W_2B-P2 (Seismic triggering of volcanic eruptions and related activities) Date/Time: July 21 Poster.
- Chester, F.M., C. Rowe, K. Ujiie, J. Kirkpatrick, C. Regalla, F. Remitti, J.C. Moore, V. Toy, M. Wolfson-Schwehr, S. Bose, J. Kameda, J.J. Mori, E.E. Brodsky, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists, 2013. Structure and Composition of the Plate-Boundary Slip Zone for the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, v. 342, 1208-1211.
- Fujii, T., A. Yasuda and A. Yasuda, 2013, Depths of two magma chambers of the Fuji 1707 eruption, IAVCEI2013 abstract, 189.
- Fukuyama, E., K. Mizoguchi, F. Yamashita, T. Togo, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, T. Shimamoto, T. Mikoshiba, M. Sato, C. Minowa, T. Kanezawa, H. Kurokawa and T. Sato, 2014, Large-scale biaxial friction apparatus using a NIED large-scale shaking table - Design of apparatus and preliminary results -, Report of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 81, 1-21.
- 古畑圭介・道林克禎・山下浩之, 2013, オマーンオフィオライトモホ遷移帯に発達した延性剪断帯におけるマフィック岩の全岩化学組成, 静岡大学地球科学研究報告, no. 40, 13-19.
- 波多野恭弘, 2013, 摩擦法則におけるマイクロ・マクロ対応, 表面科学 34 巻 2 号 p. 62-67.
- Harigane, Y., K. Michibayashi, T. Morishita, K. Tani, H. Dick, and O. Ishizuka, 2013, The earliest mantle fabrics formed during subduction zone infancy, *Earth and Planetary Science Letters*, 377-378: 106-113.
- Hiraga, T., T. Miyazaki, H. Yoshida, and M.E. Zimmerman, 2013, Comparison of microstructures in superplastically deformed synthetic materials and natural mylonites: Mineral aggregation via grain boundary sliding, *Geology*, doi:10.1130/G34407.1.
- 平田萌々子・武藤 潤・長濱裕幸・大槻憲四郎, 2013, 模擬断層ガウジの圧密に関する実験的研究, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013 年 5 月 19 日-24 日.
- 平田萌々子・武藤 潤・長濱裕幸・大槻憲四郎, 2013, 模擬断層ガウジの挙動に関する実験的研究. 日本地質学会仙台大会, 東北大学, 2013 年 9 月 14 日-16 日.
- Hirauchi, K., J. Muto, and K. Otsuki, 2013, Effect of stress state on slow rupture propagation in subduction fault zones, American Geophysical Union, T41A-2550, San Francisco, U.S.A.
- Ichihara, M., J.J. Lyons, and A. Yokoo, 2013, Switching from seismic to seismo-acoustic harmonic tremor at a transition of eruptive activity during the Shinmoe-dake 2011 eruption, *Earth Planet Space*, 65, 633-643.
- Ichihara, M., M. Takeo, Y. Maehara, J. Oikawa, and T. Ohminato, 2013, Shallow and deep triggering of Plinian-type eruptions inferred from acoustic and seismic eruption tremors, IAVCEI, 2A-08, (2012-7-23, Kagoshima, Invited)

- 飯田拓郎・矢部康男, 2013, 摩擦すべりに伴う AE 活動と断層の摩擦特性の関係, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 神奈川県民ホール, 2013 年 10 月 7-9 日.
- Ji, S., T. Shao, K. Michibayashi, C. Long, Q. Wang, Y. Kondo, W. Zhao, and M. H. Salisbury, 2013, A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics and elastic moduli of amphibolite-rich rocks, *Journal of Geophysical Research*, 118: 1-30.
- Kame, N., K. Nagata, M. Nakatani, T. Kusakabe, 2103a, Strength drop as a detectable earthquake precursor by means of acoustic monitoring at a natural scale, AGU 2013 Fall Meeting, San Francisco (USA), S11A-2275.
- 亀 伸樹・藤田哲史・中谷正生・日下部哲也, 2013b, 地震先行現象としての断層強度低下量:RSF 地震サイクルモデルと断層透過波モデルからの観測検知可能性の検討, SSS31-30, 地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 千葉.
- Kameda, M., M. Ichihara, S. Shimanuki, W. Okabe, and T. Shida, 2013, Delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue by decompression, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 258, 113-125.
- Kawaguchi, R., T. Nishimura, H. Sato, 2013, Volcano inflation prior to an eruption: Numerical simulations based on a 1-D magma flow model in an open conduit, *Earth, Planets and Space*, 65, 1477-1489.
- Kawakata, H., N. Yoshimitsu, E. Fukuyama, K. Mizoguchi, F. Yamashita, T. Togo, M. Sato, and I. Doi, 2013, Characteristics of Transmitting Waves across a Fault Plane during Stick Slip Tests Using a Large Shaking-Table, *Proc. 6th Int. Symp. on In-Situ Rock Stress*, Sendai, 1156-1161.
- 川方裕則・吉光奈奈・中谷正生・J. Philipp・土井一生・直井 誠・村上 理・A. Ward・G. Morema・V. Visser・S. Khambule・T. Masakale・A. Milev・R. Durrheim・L. Ribeiro・M. Ward・小笠原 宏, 2013, 断層透過弾性波のモニタリング - 南アフリカ Cooke4 金鉱山, 日本地震学会 2013 年秋季大会, A11-08, 神奈川県民ホール, 横浜.
- Kim, D., I. Katayama, K. Michibayashi, and T. Tsujimori, 2013, Rheological contrast between glaucophane and lawsonite in naturally deformed blueschist from Diablo Range, California. *Island Arc*, 22: 63-73.
- Kim, D., I. Katayama, K. Michibayashi, and T. Tsujimori, 2013, Deformation fabrics of natural blueschists and implications for seismic anisotropy in subducting oceanic crust, *Physics of Earth and Planetary Interior*, 222: 8-21.
- Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano, 2013a, Granular friction in a wide range of shear rates, *POWDERS AND GRAINS 2013: Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media*, AIP Conf. Proc. 1542, pp. 32-37.
- Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano, 2013b, Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1295-1299, doi:10.1002/grl.50311.
- Kuwano, O., M. Nakatani, T. Hatano, and H. Sakaguchi, 2013c, Relaxation processes of a thick granular layer at seismic slip rates, AGU 2013 Fall meeting, MR13A-2274, San Francisco, Calif., 9-13 Dec, 2013.
- 桑野 修・中谷正生・波多野恭弘・阪口 秀, 2013d, 高速剪断される厚い粉体層の緩和過程, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉.
- 桑野 修・中谷正生・波多野恭弘・阪口 秀, 2013e, 高速すべり速度ステップ実験で観察された長い Dc, 日本地震学会 2013 年秋季大会, 横浜.
- Lacanna, G., M. Ichihara, M. Iwakuni, M. Takeo, M. Iguchi, and M. Ripepe, 2014, Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation, *J. Geophys. Res.*, in press.

- Masuda, K., 2013, Source duration of stress and water-pressure induced seismicity derived from experimental analysis of P wave pulse width in granite, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3567–3571, DOI: 10.1002/grl.50691.
- Masuda, K., T. Satoh, and O. Nishizawa, 2013, Ultrasonic Transmission and Acoustic Emission Monitoring of Injection-Induced Fracture Processes in Rock Samples, *Proceedings of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 23-26 June 2013, San Francisco, California, USA*, ARMA13-295.
- 増田俊明・大森康友, 2013, 石英のマイヤー硬度: 結晶方位依存性について, 日本地質学会第 120 年学術大会, 仙台.
- Michibayashi, K., M. Suzuki, and N. Komori, 2013a, Progressive deformation partitioning during the deformation and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. *Tectonophysics*, 587: 79–88.
- Michibayashi, K. and T. Oohara, 2013b, Olivine fabric evolution in a hydrated ductile shear zone at the Moho Transition Zone, Oman Ophiolite, *Earth and Planetary Science Letters*, 377–378: 299–310.
- Miwa, T. and A. Toramaru, 2013, Conduit process in vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan: Inference from comparison of volcanic ash with pressure wave and seismic data, *Bull. Volcano.*, 75, 685: DOI 10.1007/s00445-012-0685-y.
- Miyazaki, T., K. Sueyoshi and T. Hiraga, 2013, Olivine crystals align during diffusion creep of Earth's upper mantle, *Nature*, 502: 321–326.
- 宮崎敏雄・山崎慎一・土屋範芳・奥村 聡・山田亮一・中村美千彦・長橋良隆・吉田武義, 2014, 偏光光学系方式の EDXRF による火成岩全岩化学組成分析, 岩石鉱物科学, 印刷中.
- 村上 理・川方裕則・吉光奈奈・中谷正生・直井 誠・J. Philipp・T. Masakale・T. Kgarume・L. Ribeiro・森谷祐一・矢部康男・A. Ward・R. Durrheim・小笠原 宏, 2013, 能動震源を用いた南アフリカ金鉱山微小破壊観測網のセンサー特性の時間変化の推定, 日本地震学会 2013 年秋季大会, P1-04, 神奈川県民ホール, 横浜.
- 中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸, 2012, Pulverized Rock の微細構造: サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線, 2012 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場, 2012 年 5 月 21 日・22 日.
- 直井 誠・中谷正生・大槻憲四郎・T. Kgarume・J. Philipp・T. Masakale・L. Ribeiro・森谷祐一・村上 理・矢部康男・川方裕則・A. Ward・R. Durrheim・小笠原 宏, 2013, 南アフリカ金鉱山地下 1 km 深において, 載荷される断層上で観察された $-5.1 \leq M_w \leq -3.6$ の繰り返し地震, 日本地震学会秋季大会, A11-09, 神奈川県民ホール, 2013. 10. 7.
- Saishu, H., A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 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
- 佐藤隆司・北川有一・重松紀生・高橋誠・塚本齊・木口努・板場智史・梅田康弘・佐藤努・関陽児・小泉尚嗣, 2013, Shallow Crustal Stress around Shikoku and Kii Region, SW Japan, inferred from Hydraulic Fracturing Tests and Borehole Wall Observations, *Proc. on the 6th International Symposium on In-situ Rock Stress*, 661–666.
- 佐藤隆司・雷興林, 2013, 応力の微小変動と地震活動に関する実験的研究, *GSJ 地質ニュース*, 2, 7, 220.
- Satoh, T., X. Lei, M. Nakatani, Y. Yabe, M. Naoi, and G. Morema, 2013, Quasi-static fault growth in a gabbro sample retrieved from a South African deep gold mine revealed by multichannel ae monitoring, *Proceeding of the 8th International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines*, 61–68.

- Satsukawa, T., B. Ildefonse, D. Mainprice, L. F. G. Morales, K. Michibayashi, and F. Barou, 2013, A database of plagioclase crystal preferred orientations (CPO) and microstructures - implications for CPO origin, strength, symmetry and seismic anisotropy, *Solid Earth*, 4: 511-542.
- Sekiguchi, C., N. Hirano, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2013, Spectroscopic determination of the critical temperatures and pressures of H₂O, CO₂ and C₂H₅OH, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 108, 1-10.
- Suzuki, Y., A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Kaneko, S. Nakada, and T. Fujii, 2013, Syneruptive deep magma transfer and shallow magma remobilization during the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan-Constraints from melt inclusions and phase equilibria experiments-, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257, 184-204.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, K. Kanagawa, and A. Inoue, 2013, Contrasting hydrological and mechanical properties of clayey and silty muds cored from the shallow Nankai Trough accretionary prism, *Tectonophysics*, 600, 63-74, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.008>.
- 高橋美紀・東 修平・伊東英紀・金川久一・井上厚行, 2013, 南海トラフ付加体浅部堆積物の摩擦特性, 日本地質学会第 120 年学術大会, R13-0-1, 仙台.
- 高橋美紀・北島弘子, 2013, 南海掘削試料を用いた堆積岩の力学特性, *GSJ 地質ニュース*, 2, 7, 220.
- Takeo, M., Y. Maehara, M. Ichihara, T. Ohminato, R. Kamata, and J. Oikawa, 2013, Ground deformation cycles in a magma-effusive stage, sub-Plinian and vulcanian eruptions at Kirishima volcanoes, Japan, 118, 1-16, doi:10.1002/jgrb.50278.
- 田中伸明・和田純一・金川久一, 2013, 窒素雰囲気下におけるドレライトの摩擦強度の温度依存性, 日本地質学会第 120 年学術大会, R13-P-2, 仙台.
- Tasaka, M. and T. Hiraga, 2013a, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 1: Grain size and grain growth laws, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1002/jgrb.50285.
- Tasaka, M., T. Hiraga, and M.E. Zimmerman, 2013b, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 2: Deformation experiments, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1002/jgrb.50284.
- Tasaka, M., T. Hiraga, and K. Michibayashi, 2014, Influence of mineral fraction on the rheological properties of forsterite + enstatite during grain size sensitive creep 3: Application of grain growth and flow laws on peridotite ultramylonite, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1002/2013JB010619.
- Tanikawa, W., H. Mukoyoshi, O. Tadai, T. Hirose, A. Tsutsumi, and W. Lin, 2012, Velocity dependence of shear-induced permeability associated with frictional behavior in fault zones of the Nankai subduction zone, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JB008956.
- Toramaru, A. and K. Maeda, 2013, Mass and style of eruptions in experimental geysers, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 257, 227-239.
- Toramaru, A. and K. Maeda, 2013, Laboratory geyser: Insights into predictability of mass and style of eruptions, IAVCEI 2013 Scientific Assembly - July 20 - 24, Kagoshima, Japan OP1_2K-04 (Experimental volcanology) RoomA1 Date/Time: July 2015: 15-15:30.
- Ujiie, K., H. Tanaka, T. Saito, A. Tsutsumi, J. J. Mori, J. Kameda, E. E. Brodsky, F. M. Chester, N. Eguchi, S. Toczko, Expedition 343 and 343T Scientists, 2013. Low Coseismic Shear Stress on the Tohoku-Oki Megathrust Determined from Laboratory Experiments, *Science*, v. 342, 1211-1214.

- 和田純一・金川久一・大橋聖和・高橋美紀・北島弘子・井上厚行・廣瀬丈洋・安東淳一, 2013, ドレライト粉砕ガウジの吸水と低～高速摩擦特性に対する影響, 日本地質学会第120年学術大会, R13-P-3, 仙台.
- Yamaki, J., J. Muto, H. Nagahama, H., O. Sasaki, and H. Kano, 2013, Fractal characteristic of fracture in glass or single crystals of quartz by 3D X-ray CT measurement, proceeding in The 6th International Symposium on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, 150.
- Watanabe, T., Y. Shirasugi, and K. Michibayashi, 2014, A new method for calculating seismic velocities in rocks containing strongly dimensionally anisotropic mineral grains and its application to antigorite-bearing serpentinite mylonites, *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 24-35.
- Watanabe, T., Y. Shirasugi, and K. Michibayashi, 2013, A new method for calculating seismic velocities in antigorite-bearing serpentinites. AGU Fall Meeting 2013, MR43A-2392.
- Yamaki, J., J. Muto, H. Nagahama, O. Sasaki, and H. Kano, 2013, Fractal properties of fracture in rock mineral using 3D X-ray CT measurement, proceeding in 10th International Workshop 56 on WATER DYNAMICS, Sendai, Japan, 82.
- 八巻淳子・武藤潤・長濱裕幸・佐々木治・鹿納晴尚, 2013, 3次元X線CTを用いた岩石試料の割れ目のフラクタル幾何学的特性, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ, 2013年5月19日-24日.
- 八巻淳子・武藤潤・長濱裕幸・佐々木治・鹿納晴尚, 2013, X線CTを用いた岩石割れ目の空間分布の異方性・不均質性. 日本地質学会仙台大会, 東北大学, 2013年9月14日-16日.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, and K. Mizoguchi, 2014, Probing the slip-weakening mechanism of earthquakes with electrical conductivity: Rapid transition from asperity contact to gouge comminution, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL058671
- Yasuda, A., 2013, Quantitative analysis of water concentration in melt inclusions by reflectance micro-FTIR spectroscopy, IAVCEI2013 abstract, 563.
- 安田敦, 2013, FT-IR 顕微反射分光法による微小な火山ガラス試料の揮発性成分定量, 日本火山学会秋季大会予稿集, 75.
- Yoshida, S., M. Nakatani, and N. Kato, 2013, Recovery of plate coupling at a ruptured asperity, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrb.50172.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, and N. Takahashi, 2013, The frequency-magnitude relation of broadband recorded AE under a triaxial compressive condition, IAHS - IAPSO - IASPEI Joint Assembly in Gothenburg, S101S2.07, Gothenburg, Sweden, 2013. 7. 23.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, and N. Takahashi, 2013, A scaling relationship between AE and natural earthquakes, American Geophysical Union 2013 Fall Meeting, S33D-2474, USA, San Francisco, Moscone Center, 2013. 12. 11.
- 吉光奈奈・川方裕則・高橋直樹, 2013, 三軸条件下における広帯域連続集録から得られたAEのコーナー周波数と地震モーメントの関係, 日本地球惑星科学連合2013年大会, SSS28-15, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2013. 5. 23.