

## 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)

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目指した実験・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。

火山噴火過程や噴火準備過程、さらには噴火シナリオ、噴火推移予測システム構築を意識して、素過程に関係づけた観測量解釈の高度化、噴火現象における素過程の役割と評価、複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明、素過程データ抽出のための技術開発、素過程に注目した噴火様式推移の支配要因の特定、に関する研究を行った。

### 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 溶液を用いて、100MPa の圧力のもと、300°C および 400°C における石英と珪灰石の溶解度測定を行い、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純水に比べて、400°C で 20% 程度、300°C で 36% 程度高い。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 (東北大学 [課題番号: 1214])。

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 (東北大学 [課題番号: 1214])。

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、最大 0.5wt% の水を導入させながら、固体圧試験機を用いて、温度 900°C、封圧 1 GPa のもとで剪断変形実験を行い、無水の人工アノーサイト多結晶体の流動特性を調べた。多結晶体の平均粒径は 3 ミクロンで、5 vol% のシリカリッチなメルトを含む。剪断ひずみ速度約  $10^{-4}$ /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 1000MPa まで達する。一方、0.5wt% 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。0.5wt% の水を添加した試料では塑性変形が卓越しており、歪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 130ppmH<sub>2</sub>O であった。一方、0.5wt% の水を添加し、剪断歪が局所化している領域では最大 550ppmH<sub>2</sub>O 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 250ppmH<sub>2</sub>O 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 (東北大学 [課題番号: 1214])。

超微小硬度計により、c 軸に垂直な面に圧痕を形成した石英を、亜臨界水に浸して溶解実験を行っ

た。圧痕は明瞭に大きくなっており、かなりの速度で溶解するが、非変形部ではほとんど溶解しないことを確認した。このことは、き裂などの欠陥のある岩石の熱水への溶解が、従来の予想よりも早く進むことを示唆する（静岡大学 [課題番号：2915]）。

#### （多体粒子系の摩擦）

破壊エネルギーを支配する主要因である臨界すべり量（ $D_c$ ）は、従来の低速すべり実験では mm 以下と見積もられてきたが、Chambon et al. (2006)は、すべりのほとんどが厚み数粒子以下の狭い層に局在している状況下でも背景に厚い粉体層があれば、低速すべり（10 $\mu\text{m/s}$ ）でも数十 cm という長い  $D_c$  が生じ得ることを発見した。これは、地震発生場で一般的に期待される環境で、動的破壊に移行する前の震源核が非常に大きくなり得ることを示唆する結果である。前年度までに、東京大学地震研究所 [課題番号：1427] では粒子自体の物性変化を極力排した実験と理論の両面で、高速すべりにおいては多体粒子相互作用に支配される新たな摩擦メカニズムがあることを証明したが、今年度はこの系に厚い粉体層をはさんだ実験を行い、10m クラスの長大な  $D_c$  をもつ摩擦の緩和を見出した。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、この緩和の原因は粒子自体の物性変化ではなく、多体粒子系の構造変化が原因であることが示唆される。また、摩擦強度の変化に対応した粉体層の厚み変化も観察された（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

#### （断層破碎帯の成因）

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、顕著な剪断組織は持たないが、著しく粉砕した岩石（Pulverized rocks）が幅広く分布することが知られている。この岩石は、断層に沿って非対称に分布していることなどから、破壊伝播に伴う動的な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、両断層沿いに分布する Pulverized rocks の試料採取を行った。得られた試料の微細組織観察から、粒径分布測定を行ったところ、Pulverized rocks 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持つことが明らかになった。このことは、摩耗によって細粒物質が形成され、徐々に断層破碎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]）。

#### （高速摩擦）

粉砕法によって作成した、非晶質含有量 0-40wt% の範囲で制御したドレライトガウジを用いて、広い速度範囲での系統的な摩擦実験を行った。まず、広島大学の二軸装置を用いて、室温及び 120 $^{\circ}\text{C}$  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。定常摩擦の速度依存性はいずれもわずかに速度弱化であったが、20mm 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。すなわち、室温の実験では、非晶質分が少ない時にはすべり弱化、多い時にはすべり硬化が生じた。一方、120 $^{\circ}\text{C}$  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。これは、室温では実験中に非晶質分に水の吸着が進むためではないかと考えている。ついで、産業技術総合研究所の回転式試験機を用いて、室温下において、20 $\mu\text{m/s}$ -1.3m/s の広い速度範囲で実験をおこなった。非晶質分の量に依らず、4cm/s 以上では非常に顕著な速度弱化を示した。一方、低速レンジでは、非晶質分が多い試料の方が大きな摩擦強度を示すが、高速レンジでは逆であった。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)

摩擦面は、わずかな真実接触部でのみ応力を支えており、摩擦すべりは最終的にはそのような部分での物質の非弾性変形によって賄われる。そのような変形を理解するために、超微小硬度計を用いた圧痕形成実験を行っている。今年度は、圧痕の形成に要するエネルギーの結晶方位異方性について検討した。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。それぞれの圧子について、全ての結晶方位のデータは同一直線上にのり、結晶方位依存性は認められなかった。また、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(東京大学地震研究所[課題番号:1427])。

岩石の準静的なすべりの摩擦特性は速度・状態依存摩擦則という巨視的経験則によって記述され、地震発生の研究で多く用いられている。経験則に含まれるパラメタや状態変数の物理的な意味を明らかにするため、真実接触部の微視的クリープ変形過程に基づいて、巨視的経験則の理論的導出を行い、その微視的表現を得た。これにより、摩擦現象のスケー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])。

摩擦に伴う岩石鉱物の非晶質化のうち、石英岩の非晶質化は、その後の含水したゲルの生成によりすべり・速度弱化を引き起こすことから、摩擦特性にも直接影響を及ぼす。そこで、Pin-on-disk型の摩擦試験機を用いて、摩擦すべり後の石英トラックのラマン分光分析を行った。摩擦に伴い、 $\text{SiO}_4$ 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形成されていることが明らかになった。非晶質化は、高速すべりを必要としないことから、真実接触点での高応力下で、 $\text{SiO}_4$ 中距離構造がより歪んだ平面3および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、摩擦表面に非晶質シリカの水和物が生成したことを示唆する。非晶質シリカ水和物は、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したと考えられる(東北大学[課題番号:1215])。

### 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)

沈み込み帯での地震発生過程において重要な役割を果たすと考えられている蛇紋岩の分布を地震波速度構造にもとづいてマッピングするためには、蛇紋岩の弾性的性質の理解が不可欠である。しかし、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媒質では、従来のVoigt平均やReuss平均による多結晶体の弾性定数の見積もりは不確定性が大きい。アンチゴライトのみからなり、結晶方位がランダムである等方的な蛇紋岩を考えた場合、Voigt平均とReuss平均の間にはP波速度、S波速度ともに1km/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、昨年度に開発した、粒子形状を考慮した計算方法を応用して、等方的な蛇紋岩の弾性波速度(常温、常圧)を求めた。P波速度は6.70km/s、S波速度は3.78km/sと見積もられ、これから得られる $V_p/V_s$ は1.77であり、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、流体の存在を意味していると考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:1428])。

このような流体が、実際にどのような場所にどのような状態で存在しているかを明らかにするため、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った。オマーンオフィオライト北部フィズ岩体に露出する延性剪断帯は、海洋地殻とその下部のマントル物質を横切る大剪断帯である。この

剪断帯の、特に地殻-マントル境界において角閃石が見出された。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はマントルからの水みちとしての機能をもつ可能性が十分に考えられる（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）条件下で実験的に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、流動則のパラメタ、特に、活性化エネルギーを高い精度で求める必要がある。そこで、高温・大気圧下でのフォルステライト多結晶の一軸圧縮クリープ試験により、流動応力に対する温度の影響を調べた。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測定も行った。一般に、クリープは最も遅いイオン種の拡散過程により律速され、逆に電気伝導度は最も速いイオン種の拡散過程に律速されていると考えられているので、クリープ速度と電気伝導度の温度依存性（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が理解できると期待される。これより、地球内部の流動変形における律速過程を推定し、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、体積比 90%のフォルステライト ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) と 10%のエンスタタイト ( $\text{MgSiO}_3$ ) から成る多結晶焼結体である。圧縮クリープ試験には、管状炉が付設されたインストロン型の変形試験機を用いた。実験中の粒径変化を抑えるため、試料に負荷する前に、実験を行う最高温度で粒径を飽和させた。試験中の応力は 10-20MPa 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-ひずみ速度の関係が得られた。ピストンと試料の接触部である上部および下部の SiC をそれぞれ電極として印加した 2 V 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測定した。インピーダンス測定は、1360°C から 1200°C まで 10°C 毎に行った。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、実験の温度領域で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  $722 \pm 1 \text{ kJ/mol}$  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）

3次元速度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。有機多結晶を岩石のアナログ物質として用い、試料のヤング率  $E$  と減衰  $Q$  を様々な周波数 (10-0.1mHz) で精密に測定できる強制振動型の変形実験装置を開発した。これまでの実験から、減衰スペクトル  $Q(f)$  の温度  $T$ 、粒径  $d$ 、メルト分率  $\phi$  に対する依存性には相似則が存在し、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のデータについても成り立ち、 $Q(f/f_M)$  がアナログ物質と同一の曲線上に載ることから、多結晶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、マントルのマックスウエル周波数で地震波の周波数を規格化すると、実験の規格化周波数が  $5 \times 10^4$  であるのに対して、地震波のそれは 2桁以上高周波の  $10^6$ - $10^9$  であり、実験データが地震波帯域をカバーしていないことも分かった。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予備的実験データは、高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している（東京大学地震研究所〔課題番号：1428〕）。

#### （地殻の物性）

地殻・マントルの正確な物性測定に必要な高緻密・極細粒多結晶体の合成法の開発を引き続き行った。今年度は、下部地殻主要鉱物である斜長石の多結晶体の合成を目標にした。ナノサイズの粒径を有する  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の微粒粉を出発物質として、粉の混合、仮焼き、真空焼結を経て、ポア率 1%、粒径 1 ミクロンの多結晶体合成に成功した。最大で、直径 5 mm、高さ 10 mm の円柱形の試料体を作ることも可能である。従来、斜長石の合成試料は、ガラスを出発材料に用いて作られてきたが、ガラス相が最後まで残ってしまうこと、また、そのガラス相に入る水を完全に脱水できない問題があった。ガラスおよび水は、試料の変形および電気的特性に大きな影響を与えるので、これまでは、下部地殻の物性を正確に測定することは困難であった。一方、今回合成した試料は、全く水を含まない完全結晶体であるため、下部地殻物性を知る上での基準試料となることが期待される。

#### ウ. 摩擦・破壊現象の規模依存性

##### （断層摩擦のスケーリング）

破壊・変形の規準として、応力の単位で表現される摩擦強度以外に、 $\text{J/m}^2$  の単位であらわされる破壊エネルギーがあり、これが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示されている。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高いはずだと指摘した。静的応力降下量が地震のサイズに依存しないという経験則から、繰り返し間隔と地震のサイズは同一視できる。このアイデアの拡張として、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) に依存しないと仮定して3次元の地震サイクルシミュレーションを行ったところ、大きな地震ほど応力降下量が小さくなるという結果を得た。逆に、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を、簡単な破壊力学的考察で示すことができる。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〕）。

摩擦強度の回復は、さまざまな時定数をもつ物理化学過程により生じる。Kato and Yoshida (2011) は、東北地方太平洋沖地震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開始し、周囲で起こる余効すべりにより次の M7 級地震が早められると予想した。仮定した速度及び状態依存摩擦則では非常に速く強度が回復するためである。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ようである。そこで、室内実験で示されている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。実験では、カットオフタイムは 10 桁程度変わりうる。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った。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。天然の断層では強度回復に二種類以上の異なる素過程が関与している可能性がある。そこで、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〕）。

防災科学技術研究所の大型振動台を用いた二軸すべり摩擦実験を行った。断層のサイズは0.5m×1.5mで、断層に印加した法線応力は1.3MPaである。0.1-10mm/sのすべり速度域では、これまでの小サンプルを用いた実験結果と遜色のない摩擦係数が得られた。また、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。このデータの解析により、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、新たな知見が得られると期待される（防災科学技術研究所 [課題番号：3015]）。

#### （断層面形状の階層性）

断層面は生来的に不均質であり、それが地震の多様性を生む。断層面上の距離  $x$  とその点上の測度（例えば凹凸の振幅  $h$ ）との間に  $h = \beta x^H$  の関係にあればフラクタルであり、フラクタル次元  $D$  は  $D = E + 1 - H$  である（ $E$  はユークリッド次元、 $H$  はハースト指数）。1mm から 100km オーダーの断層の観察によれば、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 $\beta$  は約 0.04 である。①と②の事実は地震学的な推定と調和する。③は本震とサブイベント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。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  $\beta$  が約 0.04 のとき、 $U \propto L^{0.46}$  を再現するようだ。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のジオメトリーそのものと考えてよい（東北大学 [課題番号：1215]）。

#### （室内実験で観測される AE のスケールリング則）

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：10MPa）を実施した。試料表面に7台の広帯域トランスデューサ（感度帯域：100-2000kHz）を貼付し、高分解能（14 bit）・多チャンネルでAEを観測した。約6時間の実験中、1分以内の欠測が数回あったのを除いて、AE波形を20MS/sで連続集録することに成功した。ピーク強度（296 MPa）に達した以降、約24MPa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。回収後の試料に対してX線CTスキャンをおこない、明瞭な一枚の成長途上の断層を試料内に確認した。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震源は、断層に対応する位置に分布しており、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校正をおこなった後、これら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。その結果、AEの地震モーメントは $M_w$ -8 から-7程度に相当し、コーナー周波数の-3乗に比例することが明らかになった。さらに、このスケールリング則は自然地震のスケールリング則の延長上に位置しており、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が示された（立命館大学 [課題番号：2402]）。

#### （掘削試料の解析）

回転式中-高速摩擦試験機を用いて、付加体物質（付加体泥質岩、南海掘削試料）の摩擦実験をおこなった。統合国際深海掘削計画（IODP）Exp. 334において、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）にて採取されたココスプレート上の生物起源堆積物について行った摩擦実験の結果、数十mm/sより高速のすべり速度条件で摩擦係数が0.2以下に低下するという著しい速度弱化的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 試料について，原位置に近い条件（室温，封圧 36-58MPa，間隙水圧 28-43MPa）のもと，軸方向の変位速度を 0.1，1，10um/s でステップ状に変化させて三軸摩擦実験を行ったところ，摩擦強度と粘土鉱物含有量に負の相関が認められた。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% の凝灰岩試料では約 0.7，約 30wt% のシルト質泥岩試料においては約 0.53，さらに約 40 wt% の粘土質泥岩試料では約 0.25 であった。また，すべり依存挙動にも粘土鉱物含有量との相関が認められた。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，摩擦強度の変位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，変位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を調べ，過去の応力状態を見積もった。脆性-塑性遷移領域直上で被った差応力は 100MPa 未満，脆性-塑性遷移領域直下で被った差応力は 200MPa 程度であることが明らかになった（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）鉱山における AE 観測では，2012 年 4 月から 12 月の期間中，のべ 140 日にわたり，合計 605.6 万個のトリガー波形を収録した。このうち，2012 年 5 月 17 日までのデータに関して，自動処理による震源決定をおこない，1,044,416 個の信頼性の高い震源が求められた。昨年度に解析した分を含めると，合計 10 ヶ月間，1,509,568 個のイベントからなる信頼性の高い震源カタログが作成できている。昨年度に報告した，採掘前線から離れて存在する薄い面状の AE クラスタのうち，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。これらの薄い面状のクラスタを示す AE に対して相対震源決定をおこなったところ，AE クラスタの厚さは薄いものでは 50cm 程度と，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  $M_w$  -2 以下であり，通常の鉱山地震観測網（検知限界  $M_w$  -1 程度）では検知できない非常に小さいイベントである。面状クラスタを構成する AE のサイズ分布はべき乗則に従うことが確認された。サイズ分布の  $b$  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，採掘前線直近に分布する 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）

開口型火道を持つ山体変形のシミュレーションを行った。本年度は，小気泡の上昇，スラグ流での気泡の上昇，気泡の拡散成長の効果を比較検討した。その結果，ストロンボリ火山で観測される，噴火直前の加速的膨張は，その時間スケールの点から，小気泡の上昇が最もふさわしいことがわかった。火山性微動の仕組みの研究では，深部低周波微動に対して，固液二相系における流体亀裂振動の問題を定式化し，sine-Gordon 方程式に帰着することがわかった（東北大学理学系研究科 [課題番号：1216]）。

近年，噴火に伴う振動現象が，地震計だけではなく空振計でも記録されるようになってきた。地盤の振動と空気振動の両方を適切に解析することで，噴火の最中の火道内部や，火口付近で起こって

いる物理過程についてより進んだ理解が得られる可能性が出てきている。霧島新燃岳 2011 年噴火について、地震と空振のデータに含まれる様々な情報を適切に整理し解析する手法を開発し、その手法を 1 月 26 日から 27 日に起こった 3 回の準プリニー式噴火の観測データに応用した。その結果、3 つの準プリニー式噴火において火道内過程に違いがあることがわかってきた。1 回目と 3 回目の噴火では、地震動と空振の間の相関は悪い。この噴火では、噴出率増大の前に地震活動が活発になり、火道浅部での増圧・急減圧が観測されている。一方、2 回目の噴火では、地震動と空振の間の相関はよく、地震活動の活発化や急減圧は観測されていない（図 1）。地震動と空振の相関がよいことは、どちらも火口近傍での似たような励起源により振動が励起されていること意味し、相関が悪いことは、励起の仕組みに何か違いがあることを意味する。さらに、これまでの衝撃波管アナログ実験の結果から、1 目と 3 回目の噴火では噴出率増大前の急減圧によって遅延破砕が起こっていた可能性が示唆される。この結果は、観測データ間及び観測データと現象の間にある関係性を物理的理解に基づいて見ることによって、観測データから噴出率の推移予測が行える可能性を示している（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）

マグマのレオロジーは、その非ニュートン性のために、さまざまな非線形現象を引き起こす。そのひとつは、粘性領域と脆性領域の変形速度による遷移である。一般的なレオロジー試験では、破壊面や運動状態の空間分布を時間の関数として知ることはできない。そのため、脆性破壊のように極めて局在する、こうした非線形性の強い現象の理解には、力学応答と同時にその現象をその場で観察することが重要になる。本年度、シンクロトロン放射光 X 線を用いて、高速変形する流紋岩マグマの脆性破壊現象を、その場観察することに成功した。円筒形の試料に対して、中心軸を中心として上面を回転させる実験では、破断面が核形成し、円錐状の面に発達して行く様子が観察された。詳しい解析は今後なされるが、マグマの破壊現象の動力的側面の理解が一気に進む可能性が持てる研究成果だ（東北大学理学系研究科 [課題番号：1216]）。

昨年までに行った、間欠泉の噴出量と噴出様式の支配要因の特定とモデル化をさらに発展させ、新しい爆発指数を提案した。従来の爆発指数 VEI は、その爆発性に関わらず、噴出量でほぼ一意的に決められていた。本研究で提案した爆発指数 EI (Explosivity Index) は、総噴出量のうち火砕物の占める割合で、 $EI = \text{火砕物量} / \text{総噴出量}$ 、と定義される。モデルにおいて重要なカギは、噴出直前の過飽和度不均一で、噴火のトリガー条件を満たす過飽和度の平均値と標準偏差はお互いに補償し合う関係で様々な組み合わせを取りうる。標準偏差が大きいほど噴火は、噴出量は少なく EI も小さい。すなわち、ある決まった大きさのマグマだまりが繰り返し噴火する場合には、噴出量と爆発性が正の相関を持つ。これは、従来の VEI 指数が爆発指数として適切に機能する条件を示したことになる。しかし、噴火に関わるマグマだまりのサイズは、噴火毎火山毎に異なっている。その場合には、本研究で提案する EI の方がより明白な物理的意味づけを持つ爆発性の指標となる。さらに、本研究で明らかになった重要な点は、EI の値は、噴火による噴出量や爆発性だけでなく、マグマだまりの中に残った残留マグマの量についても意味を与えることである。結果によると、EI が小さくなるほど残留マグマの量も増える。例えば、始良カルデラ噴火などカルデラ噴火は EI=1 であり、噴火後マグマだまりが空っぽになることを意味する。これは陥没によるカルデラ形成と調和的である。富士山宝永の噴火も EI=1 なので、マグマだまりの中にはほとんど残っていないが、富士山貞観の噴火は EI=0 であり、ほとんどのマグマがマグマだまりに残っていると予想される。また、桜島の文明・安永・大正の噴火（典型的安山岩噴火）では EI=0.5 程度であり、噴出した量と同じぐらいの量のマグマをマグマだまりに

残していたと予想される。さらに、桜島の昭和の噴火ではEIはおおよそ0なので、噴出量よりも一桁多い量のマグマがマグマだまりに残っていると予想される。桜島火山についてのこれら噴出量・噴出様式と残存マグマの量の関係は、地殻変動のデータと整合的である。噴出マグマの物質的不均一性と噴出量・噴火様式のデータを蓄積し、このモデルが天然でどの程度成り立っているか評価することが今後の課題である（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）

噴火直前のメルトに溶け込んでいる揮発性成分を知ることは、噴火のポテンシャルを知る上で決定的に重要である。さらに、その濃度の頻度分布、すなわち過飽和度の不均一性を知ることは、前項で述べた噴火様式や噴出量、EIさらには残留マグマの量の理解になくてはならない情報量である。そのひとつの指標は、噴出物に含まれる斑晶中のメルト包有物（ガラス包有物）中の揮発性成分濃度である。その測定方法として、これまで発展させてきた顕微FTIR反射分光法は、比較的玄武岩質のカンラン石斑晶をターゲットとしてきた。本年度は、この方法をさらにケイ長質マグマにまで拡張するために、長石、石英、輝石の斑晶に含まれるメルト包有物に対しても手法を整備した。この手法を用いて、富士火山宝永噴火の初期白色軽石に含まれる斜方輝石のメルト包有物を測定し、4から4.5wt%の含水量を得た。今後、この手法を多くの火山噴出の噴出物に応用することによって、噴火ポテンシャルのデータベースが充実することが期待される（東京大学地震研究所[課題番号：1430]）。

## 今後の展望

### （地震発生の素過程）

幅広いすべり速度帯域で、ガウジの非晶質化や水和といった化学反応やガウジ粒子同士の力学的な相互作用が断層の巨視的摩擦特性に著しい影響を与えることが確かめられた。また、圧痕形成試験やPin-on-diskの摩擦実験では、断層摩擦のもっとも基本的な過程である真実接触点の力学的・化学的過程に関する新たな描像が得られつつある。このようなガウジの振る舞いや真実接触点の振る舞いは、従来の摩擦構成則では十分に考慮されていない。そのため、これらをより詳細に調べて定量化することが重要である。一方、天然の断層帯に分布する破碎物の粒径分布が、摩耗によってできたガウジとは異なっていることから、破碎帯は、従来考えられていたように摩耗によって徐々に発達するのではないことが示唆された。ガウジの水和や力学的相互作用が断層の巨視的摩擦に及ぼす影響は、その粒径分布にも依存するので、天然の断層帯に含まれる破碎物の生成過程を明らかにし、その粒径分布を考慮した摩擦実験を行うことが望まれる。

地殻流体としてより現実的な組成である1モルNaCl溶液の誘電率を、下部地殻に相当する環境下で測定することに成功した。また、欠陥のある結晶では、亜臨界水への石英の溶融が、従来知られていたよりも速く進むことが明らかとなった。このような、岩石-水相互作用に関する新たなデータや知見の積み重ねにより、内陸地震の発生モデルとして提唱されている断層バルブ仮説を検証できると期待される。

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媒質の巨視的な弾性波速度を計算する手法を開発した。このような媒質の $V_p/V_s$ は最大でも1.77であることから、紀伊半島下のマントルウェッジに推定されている $V_p/V_s=1.8$ の異常域には、自由水が存在することが示唆された。一方、オマーンオフィオライト延性剪断帯の微細構造からは、このような剪断帯がマントルからの水みちとして機能している可能性が示された。これらの知見は、マントル内の水輸送過程の解明に重要であり、よ

り多くの地域で事例を積み重ねることで、その標準的な描像の確立に貢献するであろう。

体積比 90%のフォルステライト ( $Mg_2SiO_4$ ) と 10%のエンスタタイト ( $MgSiO_3$ ) から成る多結晶焼結体を用いた高温・常圧下の変形試験により、これまでよりも高い精度で活性化エネルギーを推定することに成功した。高温・高圧下においても同様の手法で岩石の活性化エネルギーを測定できれば、室内実験で得られた岩石の変形則のパラメータを、これまでよりも高い信頼度で天然の環境に適用することが可能になる。

広帯域センサーにより観測した、三軸圧縮下で発生する AE のスペクトル解析から、 $M_w$ -8~7 の AE の応力降下量も自然地震のそれと同程度であることが示された。このことは、震源サイズにして 8 桁にわたり、応力降下量一定のスケーリング則が成り立つことを意味する。南アフリカ金鉱山での高感度地震観測では、G-R 則が、 $M_w$ -2 以下の極微小地震まで成り立つことが示された。このことも、非常に広いマグニチュード範囲で地震のスケーリング則が成り立っていることを示唆する。破壊力学的考察からは、破壊エネルギーが震源サイズに比例する場合には応力降下量が一定となることが示される。そして、この場合、本震破壊域の大きさが震源核の大きさに比例することが、数値計算により示された。これらの成果は、震源核を検出して地震を予知するという、予知研究の基本的なスタンスの妥当性を支持する。ただし、この数値計算に用いた摩擦則では、すでに述べたガウジ層の化学過程や力学的相互作用は考慮されていない。新たに見つかったガウジの振る舞いを定式化して、それが震源核形成過程に与える影響を評価する必要がある。

中米海溝コスタリカ沖の沈み込みインプットサイトにて採取されたココスプレート上の生物起源堆積物や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を用いた摩擦実験では、堆積物の種類ごとに摩擦特性が大きく異なることが示された。このことは、プレート境界のすべり特性の地域性を考える上で重要な示唆を与える。

#### (火山噴火の素過程)

昨年度の報告書において、「モデルを介して基礎的理解と観測量の橋渡しを行うこと」を課題として挙げた。本年度は、ある程度それを意識した研究が行えたような印象を受ける。今後、この方向性をより一層推し進め、予知研究における素過程的視点の意義と必要性を整理・確認したい。

#### 成果リスト

- Abe, J., N. Hitrano, and N. Tsuchiya (2012), Infrared spectroscopic study of water in mesoporous silica under supercritical conditions, *Journal of Material Science*, 47, 7971-7977.
- Fukuda, J., T. Okudaira, T. Satsukawa, and K. Michibayashi (2012), Solution-precipitation of K-feldspar in deformed granitoids and its relationship to the distribution of water, *Tectonophysics*, 532-535
- 福山英一・溝口一生・山下 太・東郷徹宏・川方裕則・吉光奈奈・嶋本利彦・御子柴 正・佐藤 誠・箕輪親宏 (2012), 大型振動台を用いた大型 2 軸摩擦実験, 日本地震学会講演予稿集, D31-01.
- 福山英一・山下 太・溝口一生・東郷徹宏 (2012), 透過波振幅を通して見たすべり弱化過程, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS29-05.
- Fukuyama, E., K. Mizoguchi, F. Yamashita, T. Togo, H. Kawakata, N. Yoshimitsu, T. Shimamoto, T. Mikoshiba, M. Sato, and C. Minowa (2012), Large-scale biaxial friction experiments with an assistance of the NIED shaking table, EOS (AGU Fall Meeting).

- 針金由美子・道林克禎 (2012), 走査型蛍光 X 線分析顕微鏡を用いた層状はんれい岩の組織解析: 予察, 静岡大学地球科学研究報告, no. 39, 7-27.
- Hatano, T. and O. Kuwano (2013), Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.*, 170, 3.
- 平賀岳彦・渡部泰史・宮崎智詞 (2012), 粒間流体の実体, *地球化学*, 46, 231-242.
- 星出隆志・寅丸敦志 (2012), 新燃岳 2011 年噴火噴出物から推定されるマグマの発泡・脱ガスプロセス, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- Ichihara, M., Lyons, J., Oikawa, J., and Takeo, M. (2012) Acoustic waves in the atmosphere and ground generated by volcanic activity, in: Kamakura, T., and Sugimoto, N. eds, *Nonlinear Acoustics, State-of-the-Art and Perspectives*, 327-330, Am. Inst. Phys., Melville, US. (ISNA 19).
- Ichihara, M. (2012) A tree diagram for responses of bubbly magma on rapid decompression based on bubble dynamics: an implication to the onset of explosive eruptions, *Soft matter physics & solid earth science: unifying concepts*, (2012-6-5, ERI).
- Ichihara, M., M. Takeo, and A. Yokoo (2012) Monitoring volcanic activities using correlation patterns between infrasound and ground motion, EGU2012-6856, 2012 (2012-4-22-27, Vienna).
- 入山 宙・寅丸敦志 (2012), 新燃岳 2011 年噴火の噴出物に関する基礎記載から見た初期変遷, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- 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.
- 金川久一・東 修平・高橋美紀・上原真一・井上厚行 (2012), 南海トラフ付加体浅部の半遠洋性・タービダイト起源泥質堆積物の力学的・水理学的特性, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS38-27.
- Kawakata, H., T. Okuno, I. Doi, N. Yoshimitsu, N. Takahashi, and M. Takahashi (2013), Three dimensional structure of a fault generated during a triaxial compressive test with a granite sample, *Proceedings of The 13th Japan Symposium on Rock Mechanics and The 6th Japan Korea Joint Symposium*, 979-982.
- 川方裕則・吉光奈奈・福山英一・溝口一生・山下 太・東郷徹宏・嶋本利彦・佐藤 誠・土井一生 (2012), 大型試料のせん断すべり時における透過弾性波の特徴, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, D31-02, 2012 年 10 月, 北海道.
- Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty (2012), Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.*, 84, 839.
- 吉瀬 毅・寅丸敦志 (2012), 噴火強度が変化する原因; 新燃岳 2011 年噴火の噴出物の密度の時間変化に注目した岩石学的研究, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- Kitajima, H. and D. Saffer (2012), Elevated pore pressure and anomalously low stress in regions of low frequency earthquakes along the Nankai Trough subduction megathrust, *Geophys. Res. Lett.*, 39, doi:10.1029/2012GL053793.

- Kitajima, H., F. Chester, and G. Biscontin (2012), Mechanical and hydraulic properties of subducted sediments, Nankai Trough accretionary prism: Effect of stress path, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13, doi:10.1029/2012GC004124.
- Kuwano, O., R. Ando, and T. Hatano (2013), Crossover from negative to positive shear rate dependence in granular friction, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/grl.50311 (in press).
- Lin, W., M. Conin, J.C. Moore, F.M. Chester, Y. Nakamura, J.J. Mori, L. Anderson, E.E. Brodsky, N. Eguchi, B. Cook, T. Jeppson, M. Wolfson-Schwehr, Y. Sanada, S. Saito, Y. Kido, T. Hirose, J.H. Behrmann, M. Ikari, K. Ujiie, C. Rowe, J. Kirkpatrick, S. Bose, C. Regalla, F. Remitti, V. Toy, P. Fulton, T. Mishima, T. Yang, T. Sun, T. Ishikawa, J. Sample, K. Takai, J. Kameda, S. Toczko, L. Maeda, S. Kodaira, R. Hino, D. Saffer (2013), Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Science* 339, 687-690, doi:10.1126/science.1229379.
- Lyons, J.J., M. Ichihara, A. Kurokawa, and J.M. Lees (2013) Switching between seismic and seismo-acoustic harmonic tremor simulated in the laboratory: Insights into the role of open degassing channels and magma viscosity, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrb.50067.
- Lyons, J.J., G.P. Waite, M. Ichihara, and J. M. Lees (2012) Tilt prior to explosions and the effect of topography on ultra-long-period seismic records at Fuego volcano, Guatemala, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL051184.
- 増田幸治 (2013), 岩石強度の時間依存性に対する水の影響, 第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 525-529.
- Matsumoto, K. and M. Nakamura (2012), Syn-eruptive desulfidation of pyrrhotite in the pumice of the Sakurajima 1914?15 eruption: Implication for potential magma ascent rate meter, *J. Miner. Petrol. Sci.*, 107, 206-211.
- 道林克禎 (2012), かんらん石ファブリック: 上部マントルを探る手がかり, *岩石鉱物科学*, 41, 267-274.
- Michibayashi, K. and H. Imoto (2012), Grain growth kinetics and the effect of crystallographic anisotropy on normal grain growth of quartz, *Physics and Chemistry of Minerals*, 39, 213-218.
- Michibayashi, K., Y. Kusafuka, T. Satsukawa, and S. Nasir (2012), Seismic properties of peridotite xenoliths as a clue to imaging the lithospheric mantle beneath NE Tasmania, Australia, *Tectonophysics*, 522-523, 218-223.
- 道林克禎・大原達也 (2012), 海洋地殻-マントル境界に発達した延性剪断帯と加水による軟化作用, *地球*, no. 34, 136-141.
- 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.
- 溝口一生・東郷徹宏・山下 太・福山英一・御子柴 正 (2012), 自然地震の断層すべりを模した既存断層面上の限られた領域でおこる不安定すべりに関する大型二軸摩擦実験, 日本地震学会講演予稿集, P3-35.
- 武藤 潤・中村 悠・長濱裕幸・清水以知子・三浦 崇・荒川一郎 (2012), ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化, 2012 日本地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ国際会議場.

- 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.
- 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.
- 中谷 剣・武藤 潤・西川 治・長濱裕幸・大槻憲四郎 (2012), Pulverized rock の微細構造と粒径分布: サンアンドレアス断層と有馬高槻構造線, 日本地質学会大阪大会, 大阪府立大学.
- Nakatani, T., J. Muto, O. Nishikawa, H. Nagahama, and K. Otsuki (2012), Microstructures and grain size distribution of pulverized fault rocks: Examples from San Andreas Fault and Arima-Takatsuki Tectonic Line, Tohoku University GCOE program Final symposium, Sendai, Japan.
- Nakamura, Y., J. Muto, H. Nagahama, I. Shimizu, T. Miura, and I. Arakawa (2012), Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces Geophys. Res. Lett., 39, L21303.
- 直井 誠・中谷正生・J. Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・T. Kgarume・G. Morema・S. Khambule・T. Masakale・宮川幸治・渡邊篤志・森谷祐一・村上 理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・小笠原 宏 (2012), 南アフリカ金鉱山地下 1 km 深における多点 AE 観測と 2 つの M0 級地震に関連する AE 活動, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS028-07, 2012 年 5 月, 千葉.
- Naoi, M., M. Nakatan i, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, T. Kgarume, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe, H. Kawakatai, N. Yoshimitsu, T. Ward and H. Ogasawara, 2012, Magnitude-frequency distributions of AEs associated with the mining front and pre-existing faults-cases from SATREPS array operating in a South African gold mine, 36, ECGS Workshop 2012, October 3-5, 2012, Alvisse Parc Hotel, Luxembourg.
- 直井 誠・中谷正生・J. Philipp・堀内茂木・大槻憲四郎・T. Kgarume・G. Morema・S. Khambule・T. Masakale・宮川幸治・渡邊篤志・森谷祐一・村上 理・矢部康男・川方裕則・吉光奈奈・T. Ward・R. Durrheim・小笠原宏 (2012), 南アフリカ金鉱山における微小破壊 ( $-3.7 \leq M_w \leq 1.3$ ) の規模別頻度分布と採掘発破前後の  $b$  値の安定性, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, P1-50, 2012 年 10 月, 北海道.
- Ohara, Y., M. Reagan, K. Fujikura, H. Watanabe, K. Michibayashi, T. Ishii, R. J. Stern, I. Pujana, F. Martinez, G. Girard, J. Ribeiro, M. Brounce, N. Komori, and M. Kino (2012), A serpentine-hosted ecosystem in the Southern Mariana Forearc, Proceeding of the National Academy of Science, 109, 2831-2835.
- Ohzono, M., Y. Ohta, T. Iinuma, S. Miura, and J. Muto (2012), Geodetic evidence of viscoelastic relaxation after the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake. Earth Planets Space, 64 759-764.
- 大槻憲四郎 (2012), 断層帯の階層的フラクタル幾可の普遍則: 地震の多様を支配する鍵, 日本地質学会大阪大会, 大阪府立大学.
- Okumura, S., M. Nakamura, T. Nakano, K. Uesugi, and A. Tsuchiyama (2012), Experimental constraints on permeable gas transport in crystalline silicic magmas, Contrib. Mineral. Petrol., 164, 493-504.

- 奥村 聡・中村美千彦・上杉健太郎 (2012), 放射光 X 線を用いた流動するマグマのその場観察: 火山噴火の多様性の原因解明へ向けて, 放射光, 25, 222-228.
- Okumura, S., M. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, T. Fujioka (2013), Coupled effect of magma degassing and rheology on silicic volcanism, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 362, 163-170.
- Saishu, H., A. Okamoto, and N. Tsuchiya (2012), Mineralogical variation of silica induced by Al and Na in hydrothermal solutions, *American Mineralogist*, 97, 2060-2063.
- Saito, T., K. Ujiie, A. Tsutsumi, J. Kameda, and B. Shibasaki (2013), Geological and frictional aspects of very-low-frequency earthquakes in an accretionary prism, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/grl.50175.
- Shigematsu, N., K. Fujimoto, N. Tanaka, N. Furuya, H. Mori, and S. Wallis (2012), Internal structure of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, revealed by borehole analysis, *Tectonophysics*, 532-535, 103-118.
- Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura, Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara, and Y. Fukao (2012), Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NGE01466.
- 鈴木由希・安田 敦・外西奈津美・金子隆之・中田節也・藤井敏嗣 (2012), 霧島山新燃岳 2011 年噴火における深部マグマ供給と浅部マグマ再移動-斑晶メルト包有物と相平衡実験からの制約-, 火山学会秋季大会, 68, 御代田.
- 鈴木由希・安田 敦・外西奈津美・金子隆之・中田節也・藤井敏嗣・平林順一 (2012), 霧島山新燃岳 2011 年噴火の岩石学 3-低温端成分マグマの相平衡実験-, JGUM2012, SVC50-08.
- 高橋美紀・東 修平・上原真一・井上厚行・金川久一 (2012), 南海トラフ付加体中の半遠洋性およびタービダイト性泥岩の水理特性・強度・摩擦特性の違いについて, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-P12.
- 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*, doi:doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.008, in press.
- 高橋美紀・東 修平・上原真一・金川久一・井上厚行 (2012), 南海トラフ付加体浅部泥質堆積物の摩擦特性, 日本地質学会第 119 年学術大会, 大阪府立大学, T5-0-4.
- 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, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2011JB008956.
- Toramaru, A. and M. Kazuki (2013), Mass and style of eruptions in experimental geysers, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 257, 227-239.
- 寅丸敦志 (2012), マグマだまりにおける過飽和度揺らぎによって支配される噴出量・噴火様式・噴火様式推移のモデル, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会.
- 和田純一・金川久一・中谷正生・望月裕峰・廣瀬丈洋・安東淳一・古川 登・井上厚行 (2012), 粉砕によるドレライトの非晶質化とその摩擦特性に対する影響, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, SSS29-P21.

- 和田純一・野田博之・岡崎啓史・安東淳一・金川久一・井上厚行・廣瀬文洋・片山郁夫 (2012), ド  
レライトガウジの非晶質化と摩擦特性に対する影響, 日本地質学会第 119 年学術大会, 大阪府  
立大学, R12-P-2.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, K. Mizoguchi, and T. Togo (2012), Influences of wear material,  
fault roughness and loading rate on stick-slip behavior revealed by large-scale biaxial  
friction experiments, EOS (AGU Fall Meeting), S21B-2500.
- 山下 太・福山英一・溝口一生・東郷徹宏・御子柴 正 (2012), 大型二軸摩擦実験中に発生したステ  
ィックスリップイベントの特徴, 日本地震学会講演予稿集, P3-34.
- 吉光奈奈・川方裕則・高橋直樹 (2012), 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 (2), 日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集, SSS028-06, 2012 年 5 月, 千  
葉.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, A. Yamamoto, H. Ogasawara, and Y. Iio (2012), Temporal changes  
in attenuation of S waves through a fault zone in a South African gold mine, *Geophys.  
J. Inter.*, 191, 3, 1317-1324.
- Yoshimura, S and M. Nakamura, 2013. Flux of volcanic CO<sub>2</sub> emission estimated from melt inclusions  
and fluid transport modelling, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 361, 497-503.