

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。

火山噴火過程や噴火準備過程、更には噴火シナリオ、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。

A. 岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程

(岩石-水相互作用)

地殻流体からシリカが析出する環境と温度を明らかにするため、温度が高いほどシリカの溶解度が下がることを利用して、350-360°Cで花崗岩を溶解した熱水を400°Cの環境下にある花崗岩基板上に流し、超臨界状態でシリカに過飽和な熱水からの析出実験を行った。析出する鉱物の種類は過飽和度に支配され、析出速度は溶液中のAl濃度に強く依存することが明らかになった(東北大学 [課題番号: 1214])。

下部地殻の主要構成鉱物である長石の変形特性に水が与える影響を明らかにするため、人工斜長石多結晶体を使った変形実験を行った。SEM-EBSD分析によると、多結晶体の粒径は2-3 μm、アスペクト比2-3で結晶格子定向配向を持たない。1 GPaの封圧下で含水量0.1 wt%、温度900 °C、ひずみ速度 10^{-4} /s及び含水量0.5 wt%、温度900 °C、ひずみ速度 10^{-5} /sとした実験では、試料は、カタクラスティックフローにより変形した。また、変形後のFTIR測定により、含水試料は、メルトのピークに類似した非対称なピークを持つことが明らかになった(東北大学 [課題番号: 1214])。

石英と長石の高温高压下での摩擦特性を測定した。断層岩の摩擦特性を高温高压下で測定し、断層強度の長期的弱化に対する水の影響を明らかにした。人工的な亀裂の入った岩石試料を用いた三軸圧縮破壊実験を行い、微小破壊活動に及ぼす周期的封圧変動の影響を調べた。微小破壊活動から推定される亀裂の進展と封圧変動の相関がよいことが分かった(産業技術総合研究所 [課題番号: 5010])。

(ガウジの挙動)

前年度までに、化学反応を極力排除した摩擦実験では、高速滑り時に強烈な速度強化を示すことを確認した。今年度はまず、この実験結果を説明するために粉体動力学に基づく理論を構築した。この理論では、速度強化は、粒子の微小変形に伴うエネルギー散逸が原因であるとしており、粒子間の摩擦係数には依存しない。そのため、実効圧力が十分低ければ、化学反応生成物による潤滑が起こっても高速領域で速度強化型の摩擦が生じることを予言する。これを実証するために、摩擦熱の影響が無視できない程度の圧力(1 MPa)のもと、幅広い速度レンジで、花崗岩試料を用いた摩擦実験を行った。低速滑り領域では従来知られている

振る舞いを示すことを確認した後、中程度の滑り速度 (mm/s) において顕著な速度弱化が生じることが認められた。この弱化は他グループによる摩擦実験でもしばしば観察されるものである。速度弱化の微視的原因を調べるため、圧力を変化させて系統的なデータを取り、弱化の始まる特徴的速度が圧力に依存しないことや、弱化の度合いが flash heating 理論によって定量的に記述できることを見いだした。さらに、地震時滑り程度の高速滑り領域 (m/s) では速度強化に転じることを発見した。この強化の度合いは新たに構築した粉体動力学による理論で説明でき、粉体力学的な速度強化が 1 MPa 程度の圧力下でも発現しうることが示された (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

(高速摩擦)

昨年度までの実験で、高温・高速摩擦における強度低下が非晶質物質の生成による可能性が示された。今年度は、常温・低速における非晶質物質の摩擦を調べるために乳鉢で長時間原岩を粉砕して、39 wt%までの非晶質を含む試料を作成することに成功した。この試料をもちいて、室温下において、垂直応力約 7 MPa、変位速度 1-10 $\mu\text{m/s}$ の摩擦実験により計測された摩擦係数は約 0.55 で、このような低速度でも、非晶質物質を含まない試料の摩擦係数 (0.60) より小さいことがわかった (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

サーボ式高速せん断摩擦試験機を用いた高速せん断摩擦実験において、時々刻々と変化する滑り面の状態をモニターすることが、高速摩擦を理解する上で重要である。高速滑りにおいては、ガウジの生成が摩擦強度の変化に大きな影響を与えており、滑り弱化の主なメカニズムとなっている。その物理メカニズムを解明するためには、滑り面でのガウジ層生成過程に関する情報を得る必要がある。そこで、回転側サンプルにつけたセンサーからの信号を取り出せるように昨年度に改造したサーボ式高速せん断摩擦試験機を用い、高速滑り中の透過弾性波の振幅及び電気伝導度の連続測定を行った。透過波振幅の解析から、滑り面内に形成されるガウジ層の中の空隙が摩擦強度と関係していることがわかった。電気伝導度の解析からは、真実接触面積の時間変化の情報が得られており、これら2つのデータを同時に取得し、解析することで、高速滑り摩擦のより詳細なメカニズムを得ることができると期待される (防災科学技術研究所 [課題番号: 3015])。

(摩擦の微視的過程)

真実接触点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 cm^{-1} 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 (静岡大学 [課題番号: 2910])。

真実接触点の動的挙動を調べるため、単結晶石英のディスクと、ダイヤモンドあるいは水晶のピンを用いて、垂直応力 10-440 MPa、滑り速度 0.01-2.6 m/s で行った pin-on-disc 摩擦実験では、弱い滑り速度弱化が認められた。摩擦トラックをラマン分光分析した結果、 α 石英の固有振動モードに加えて、非晶質シリカなどで見られるはずの 4 員環や 3 員環のピークが認められた。石英ディスクの赤外分光マッピングからは、水分子中の OH 基の対称伸縮を示すブロードなピークが摩擦痕上にもみ検出された。また、摩擦表面の電子顕微鏡による観察では、直径 200 nm 程度、長さ 500 μm の、ロール状粘着性物質が認められた。以上のことは、アスペリティの高圧下で、6 員環からなる SiO_4 の中距離構造が変化して平面 3 及び 4 員環中のはずんだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進み、摩擦表面に非晶質シリカの水和物を生成したこと、さらに、非晶質シリカ水和物は潤滑物質として振舞い、速度弱化を引き起こしたことを示唆する (東北大学 [課題番号: 1215])。

昨年度、アクリルブロックの摩擦実験において、光学的に測定される接触面積と音波透過率から推定される接触剛性の関係が、強度変化の原因に依存し、一意でないことを見いだした。今年度は (Nagata et al, in press) の方法で、剪断応力と滑り速度の実測値から強度を求め、強度と一意な関係をもつのは接触面積のほうであることを示した。音波透過から断層強度を推定しようとする場合には、その感度が、強度変化の原因によって異なることに注意する必要がある (東京大学地震研究所 [課題番号: 1428])。

(地震発生に伴う電位変化)

石英を含まないハンレイ岩の forcing block 及び同質の模擬ガウジを用いた高封圧下での固着-滑り実験を行い、前兆的電位変化を検出した。電位変化は、固着-滑りイベント直前のゆっくり滑りに伴っていて、電位変化の大きさは滑り量に比例する。電位変化は滑り面近傍に設置した3対の電極によって局所的に検出された。模擬ガウジ層の微細構造の観察から、電位変化を検出した電極対の付近でR1リーデルシアが最もよく発達していることが判明した。R1リーデルシアは、安定滑りの間に形成されることが知られている。これらのことから、不安定滑りの核形成フェーズの間にR1シアに沿うゆっくり滑りがあり、それに伴って摩擦電気が発生して局所的に電位が変化したと考えられる。前兆的滑りはガウジの厚さとともに増加することが知られているので、この実験結果は、厚いガウジ層を持つ天然の断層での震源核形成フェーズでは、大きな電氣的シグナルが発生することを示唆する (東北大学 [課題番号: 1215])。

岩石破壊に伴うAEが発生する時や断層の滑り破壊時に測定される電場変動現象の規模依存性を調べるため、昨年度から、南アフリカの金鉱山内地下約1000mに設置した高感度のボアホールアンテナにより微小地震に伴う電場変動の観測を行っている。今年度は更にボアホール磁力計を作成して同鉱山内に設置し、磁場変動の観測も開始した。磁場のある成分(ビオサバール項)は電場成分に比べて地殻内を伝播する際の減衰が小さいため、電場単独の観測に比べて、より高感度の観測が行える。これまでの解析では、地震波到達時に電場及び磁場の変動が観測されているが、地震発生に伴い震源で放射されたと思われる変動は検出されていない (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

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基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。複合媒質の弾性波速度は従来、Voigt平均やReuss平均をもちいて推定されているが、アンチゴライトのような異方性が強い鉱物を含む高温型蛇紋岩の場合、これらの手法では正確な見積もりが困難である。そこで、楕円体形状の異方性物質が任意の方位分布を持って分散している媒質の地震波速度を推定できるよう、Eshelbyのインクルージョン理論を拡張した。アンチゴライト粒子をc軸方向につぶれた楕円体としてこの理論を適用すると、従来の手法に比べてより実測値に近い弾性波速度を推定することができた (東京大学地震研究所 [課題番号: 1428])。

地質スケールでの蛇紋岩の分布や変形過程を調べるために、福井県大島半島の東端に露出する待ちの山蛇紋岩体の岩石試料を構造解析した。その結果、断層境界に近い200mにブロックインマトリック構造が発達し、特に100mの幅で大規模な蛇紋岩化作用がおきていることを明らかにした。待ちの山蛇紋岩体の微細構造解析により、アンチゴライト蛇紋岩がクリソタイル蛇紋岩主体の中に取り込まれていることを発見した。さらに、アンチゴライト蛇紋岩は、内部にクリソタイルが入りこんだことによって変形していることを確認した。このことは、アンチゴライト蛇紋岩の上昇に伴い沈み込み帯で生じる変形は、アンチゴライト-クリソタイル相転移が起きる領域で顕著であることを示唆する (東京大学地震研究所 [課題番号: 1428])。

(せん断変形帯の形成メカニズム)

岩石の延性変形領域における流動実験は、岩石を構成する主要鉱物単相の試料を用いて行われることが多い。しかし、現実には多相系である岩石の強度を、単相系の強度からどのように理解すればいいのかわからない。そこで、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、せん断帯で見られる拡散クリープ条件下で二相系の変形実験を行ない、第二相(相対的に少ない相)粒子が試料の変形挙動に与える影響を調べた。まず、フォステライト-エンスタタイト系で粒成長実験を行い、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、ひずみで決定されることを示した。さらに、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が明らかになった。また、観察される強度変化は、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、マイロナイトで見られるのと類似の第二相粒子の衝突合体組織を合成細粒試料の圧縮・引張実験で見出していたが、この組織は、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、超塑性的な粒界滑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滑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滑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])。

(地震波速度に対するメルトの効果)

3次元速度不均質から地球内部の温度不均質や流体分布を定量的に推定するためには、非弾性の効果も考慮する必要がある。今年度は、メルトの存在が地震波速度に与える影響を定量的に評価するために、有機物の二成分共融系を部分溶融岩石のアナログとして用い、液相分率を0.25%から4%まで系統的に変えながら、ヤング率Eと減衰 Q^{-1} を広帯域(10-0.1mHz)で測定した。その結果、ごく少量の液相であっても、試料の粘性と非弾性に大きな影響を与えることが分かった。昨年度、液相のない系における粒径や温度の効果は、マックスウエル周波数でスケールリングされる相似則に従うことを示したが、今回、メルト相の影響も同様の相似則に従うことが明らかになった。そこで、測定を行った周波数範囲に「マックスウエル周波数によるスケールリング則」を適用すると、地震波帯域よりもかなり低周波側にきてしまうことが分かった。そこで、地震波帯域により近い規格化周波数での実験を目指して、より高周波数・低温における非弾性の精密測定に耐えるような高剛性の実験装置の開発を進めている(東京大学地震研究所[課題番号:1428])。

(地殻の物性)

メノウを実験試料とした石英の結晶成長実験結果を解析して、石英の粒成長則が求められた(Michibayashi and Imoto, 2012)。この結果に基づいて、地殻条件での温度と石英粒径の関係を導くことが可能になった。昨年度、上部地殻地震波速度構造の物質科学的実態を明らかにするために、弾性波速度と粒界クラック密度の関係をもとにしたモデル計算を行った。その際、粒径は1mmに固定していた。今年度行った粒成長実験の成果によって、岩体上昇・岩体冷却に伴う粒界クラックの発達度のモデリングに、具体的な粒径の初期値を入れることが可能になった(東京大学地震研究所[課題番号:1428])。

地殻岩石の機械的性質を実験的に求めるのに必要な試料を得るために、石英や長石といった地殻主要鉱物からなる高緻密多結晶体を合成する手法の開発を行った。高緻密多結晶体の合成法としては、ホットプレス法などの高圧条件下での合成法と真空焼結法がある。石英と長石の二相からなる系の場合、前者では減温・減圧時にクラックが発生し、後者ではボアの生成が起きてしまい、理想的な試料を合成するには至っていない。一方、単相の長石

多結晶体においては、鉱物合成の時間や温度の最適条件を探り、真空焼結法でポア率1%を切るような試料合成が可能になった（東京大学地震研究所 [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。地質構造に生じる断層の動摩擦の絶対レベルを明らかにするため、南アフリカの大深度鉱山において、M2級の地震の発生が近いと期待されている断層面を貫くボーリング孔内に高精度の温度センサーを埋設し、5点で連続観測を開始した（東京大学地震研究所 [課題番号: 1427]）。また、同じ断層の極近傍には、高容量のひずみ計と加速度計からなる動的応力変化計が埋設され、断層破損過程をとらえるための観測を行っている。動的応力変化計から100m程度の震源距離で発生したM1.3の地震の際に高容量ひずみ計で観測されたひずみ波形のスペクトルから、数kHzの高周波まで十分なS/Nがあることが確かめられた。これは、この観測のために昨年度に開発した動的応力変化計が、設計通りの性能を有していることを示している（東北大学 [課題番号: 1215]）。

（室内実験で観測されるAEのスケーリング則）

花崗岩試料を用いた一軸圧縮破壊試験において、8つの広帯域トランスデューサ（100-1000 kHz）と比較用の2つの狭帯域圧電センサーを用いてAEの連続計測（20MS/s）を実施した。試料内の速度を推定するため、試験中に数回、各トランスデューサに矩形波を印加して弾性波を放射させ、透過波計測を行った。さらに、レーザードップラー振動計で広帯域トランスデューサ表面の振動を計測し、その感度の周波数特性を推定した。また、破壊試験中に発生したAEと思われる波形のP波初動を読み取り、震源決定をおこなった。観測されたS波部分のスペクトルを広帯域トランスデューサの周波数特性で補正し、S波変位スペクトルを得た。S/Nが高く、記録が複数のトランスデューサで得られているイベントについて、地震モーメントとコーナー周波数を推定した。得られたコーナー周波数と地震モーメントの関係は、自然地震のコーナー周波数と地震モーメントの間に成り立つのと同じ3乗則にしたがっていた（立命館大学 [課題番号: 2402]）。

（南海掘削試料の解析）

南海トラフ付加体浅部（海底下約1000m）から採取されたふたつの泥質堆積物試料について、微細構造観察、粒径・孔隙率計測、粉末X線回折分析を行って特徴を把握した。また、原位置に近い条件で透水実験及び破壊実験、摩擦実験を行った。その結果、両者は起源が異なり、力学的・水理学的性質も大きく異なることが明らかとなった。石英や長石などの碎屑粒子に富み、粘土鉱物粒子が比較的少ないタービダイト起源泥試料は、孔隙が多く（約38%）、透水性が高い（浸透率 $2.3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ）。対照的に、半遠洋性泥試料は細粒均質（ $1.40 \pm 1.25 \text{ }\mu\text{m}$ ）で、スメクタイトなどの粘土鉱物粒子に富み、孔隙が少なく（約11%）、透水性が低い（ $2.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ ）。これらの試料の破壊試験と摩擦試験の結果からは、付加体浅部における断層運動に次のような傾向があることが期待される。半遠洋性泥層は変形時に非排水に近い状態となり、高間隙圧層を形成する。そのため、付加体浅部に新たに断層が形成される場合には、破壊強度が小さい半遠洋性泥層中に形成されやすいが、その運動は、比較的ゆっくりとしたものになるであろう。半遠洋性泥層中の断層は顕著な速度強化の挙動を示すので、通常地震性断層運動の発生源とはならないが、高い間隙水圧を維持するため、地震性断層運動が伝播すると間隙水の熱加圧によって強度が著しく低下し、大

きな変位が生じやすい。一方、タービダイト起源の泥層は破壊強度が大きいので、付加体浅部では断層が形成されにくい。一方、ひとたび断層が形成されれば、その運動は急激なものとなるであろう。また長期的には速度弱化の挙動を示すので、地震性断層運動の発生源になり得る。しかし、排水状態を維持するため熱加圧が起こりにくく、変位量は比較的小さいと予想される（東京大学地震研究所〔課題番号：1427〕）。

回転式中-高速摩擦試験機を用いて、 $3\ \mu\text{m/s}$ – $1\ \text{m/s}$ の滑り速度範囲において、付加体物質（付加体泥質岩、南海掘削試料）の摩擦実験を行った。本年度は特に、紀伊半島沖南海トラフ付加体中に発達する巨大分岐断層浅部及び前縁断層先端部から採取された断層物質について、低速から数十 mm/s の滑り速度で実験を行った。これにより、定常摩擦の速度依存の性質と断層内変形の特徴が抽出されつつある。具体的には、正の速度依存性を示す試料には一様に分散した剪断変形組織が発達するのに対して、負の速度依存性を示す試料においては断層に平行に近い剪断面が多数発達する様子が認められる（京都大学防災研究所〔課題番号：1814〕）。

NanTroSEIZE（南海掘削研究）等、地震発生帯に関するこれまでの掘削結果と試料分析結果を取りまとめた。その結果、高速滑りを起こしたことが昨年度の結果から示されている分岐断層上盤では、表層の強震動堆積物が1944年の東南海地震時に形成されたことが明らかになった。デコルマ上面のスラスト帯では、ハイドレート下面に対応するBSRが断層を境に不連続になっていることから、最近1万年程度以内にこの断層群が活動しており、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う圧縮がこの断層群では現在まで活動的であることが判明した（海洋研究開発機構〔課題番号：4004〕）。

巨大地震固着域を形成する断層物質の素材が何であるかを知るため、沈み込む前の四国海盆で行った掘削結果を解析している。これまでのところ、四国海盆の玄武岩内部には大量の水が含まれることが判明し、これが固着域付近で脱水分解することで水を解放している可能性がある（海洋研究開発機構〔課題番号：4004〕）。

（南アフリカ金鉱山での地震観測）

イズルウィニ鉱山において観測網がほぼ完成した。ドリリングノイズやS/Nの高いデータが得られた観測点が少ないものを除いても、ひと月あたり10万個のオーダーのイベントが収録されており、地震活動度は高い。他予算で開発した自動検出プログラムの信頼度を検定するため、1か月分のデータをもちいて試験的に震源決定を行った。数百イベントの検出値を目視で確認したところ、P波走時の検出値が10個以上、走時残差のRMSが0.2ms以下という基準を満たすイベントでは、誤検出の割合はきわめて低かった。この基準をみたす22万イベントの震源分布を見ると、90%以上は採掘前線域での活動である。これ以外の活動からは、20–100mの広がりをもつ薄い面状のクラスタが9個みつき、そのうち3クラスタは既知の地質断層と一致した。東京大学地震研究所〔課題番号：1423〕が同一サイトに埋設した加速度計に比べて、AEセンサーは感度が高いものの周波数特性が複雑である。そこで、加速度計で記録された波形との比較からAEセンサーのその場感度特性を校正した。その上で、AEセンサーで記録した波形のスペクトルレベルから、9個の面状クラスタ（それぞれ200–6000個のAEで構成されている）に属する16055個のAEの規模を推定したところ、 M_w は-5.2から0の範囲に分布していた。このうち M_w -1以上のイベントは3個しかなく、99.9%のAEは M_w -2（破壊サイズの目安1m）以下であり、非常に小さな破壊によってクラスタが構成されていることが確認できた。クラスタの活動には比較的大きな地震の余震も含まれるが、多くは定常的な活動とみられ、最近に大規模な破壊をおこしたことがない地質断層も活発な微小破壊活動を伴うことが示唆される。別の鉱山の地下3kmにもAE観測網を構築中で、AEセンサーの埋設は4割程度が完了した（立命館大学〔課題番号：2402〕）。

実験室スケールで示された破壊に先行する透過弾性波の速度や振幅の低下が、更に大きいスケールでも観測されるか否かを調べるために、南アフリカのイズルウィニ鉱山において、透過弾性波モニタリングを開始した。このサイトでは、今後1–2年の間に地震の発生が危惧される断層が同定されている。圧電型のトランスミッター（透過弾性波源）を断層の上盤側約20mの位置に埋設した。受振器には、1Hzから10kHzの範囲でフラットな感度特性

を持つ3成分加速度計を用い、上盤側に1点(断層から約7m)、下盤側に2点(断層から約7mと約13m)の計3台をほぼ一直線に埋設した。測線長は約33mである。波形は、近傍に埋設されているAEセンサーのものも含め全16ch分を、トランスミッターの励起パルスに同期して400kS/sで集録している。透過波の走時から推定した、断層を含まない部分の地震波速度は、減衰の影響を考慮しない場合、 $V_p=5850$ m/sと $V_s=3550$ m/sである。周波数依存のない減衰を考慮に入れると、 $V_p=6200$ m/sで、 $Q_p\sim 150$ である。観測は継続されており、安定した波形が集録されている。測線の近傍で大きな地震が発生していない期間の波形には変化は見られないことから、トランスミッターや加速度計と岩盤のカップリングは安定していると思われる(立命館大学[課題番号:2909])。

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)

山体変形の観測データと火道内マグマの運動を関係づける研究を継続しているが、今年度は、大気泡が火道を上昇するストロンボリ式噴火をイメージし、火道内マグマの運動をスラグ流と仮定して、山体変形を数値的に調べた。その結果、大気泡の火道内での位置と山体の膨張収縮の時間変化の間に関係があることが見付き、噴火直前での大気泡の火道内位置推定の可能性が出てきた。しかし、実際の傾斜計観測データでは収縮のフェーズが見つからず、再検討を必要とすることがわかった。また、前兆現象としての火山性微動データの意味を探るために、前年度まで開発を行ってきた手法を拡張しモデリングを行った結果、火山性地震の低周波振動特性は多孔質媒質中の間隙圧に敏感であることがわかった。このモデリング結果に基づき、2011年3月の東北地方太平洋沖地震後に観測された阿蘇火山長周期微動の活動変化を調べ、活動変化が地震による応力擾乱に伴う浅部火道周辺岩体の間隙圧変化によるものと解釈した(東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。

(噴火現象における素過程の役割と評価)

噴火の爆発性を左右している揮発性成分の挙動を調べる以下の研究を行った。(a)昨年度の研究成果に基づき、CO₂ fluxing(深部に潜在する苦鉄質マグマから浅部マグマに二酸化炭素に富む流体が供給される現象)のクロマトグラフィーモデルを構築した。このモデルにより、斑晶中のメルトの包有物のCO₂濃度から、噴火準備過程において地表で観測されるであろうガス組成の時間変化を推定することが可能となった。(b)安山岩質軽石の高温下での組織変化の実験を行い、表面張力による気泡組織の緩和が有効に進むことを明らかにした。時間スケールの点から、この過程は火道内で働いていることが示唆され、ブルカノ式噴火での火口直下のガスだまり形成のメカニズムの理解が進んだ。(c)噴火様式の分岐メカニズムについての研究をレビューし、噴火メカニズム系統樹を作成した(東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。

間欠泉アナログ実験を用いた昨年度までの研究から明らかになった、噴出直前の過飽和度(実際の火山噴火では過飽和度)の空間不均一が噴出様式を支配しているという仮説について、今年度は定量的検討を加えた。実験で得られた温度圧力の測定データから、実験条件ごとの温度揺らぎの確率密度関数(PDF)を決定し、実験条件ごとにPDFの平均値と分散の違いを検討した。その結果、噴出様式に多様性があるものは、平均の温度が低く、分散が大きかった。この結果に基づき、モデルを構築し、モンテカルロ法でシミュレートした結果、実験で得られたPDFの平均値と分散及び噴出量と噴出様式の関係が再現できることを確認した(図1)。このことによって、過飽和度の空間不均一が天然での噴火の様式や規模の支配要因である可能性がより現実的になった(九州大学大学院理学研究院[課題番号:2206])。

(複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明)

1月に始まった霧島火山群新燃岳噴火において、観測された空振と地震波形を解析し、昨年度までの研究で蓄積したノウハウに基づいて室内モデル実験をデザインし、それらの結果を統合することで、複雑現象における素過程

の役割を抽出することに成功した。新燃岳噴火においては、初期の3回の準プリニー式噴火からその後のブルカノ式噴火への移行期に、空振と地震波形両方に調和型振動が観測された。この空振（ガスの流れ）と地震波（地盤振動）の両方が励起される室内モデル実験を行った（図2）。その結果、調和型振動の特徴の時間的变化は、マグマ中のガスの断続的上昇から連続的上昇への移行の結果であると結論付けた。こうした空振と地震動の両方で調和型振動が観測された例はこれまでであるが、室内モデル実験で同様の現象が再現され、その推移の原因、系の形状変化や励起源の実態について理解が得られたのは初めてである（東京大学地震研究所[課題番号：1429]）。

（素過程データ抽出のための技術開発）

爆発性の潜在能力を把握するために噴出物に含まれる斑晶のガラス包有物中の揮発成分量の顕微赤外分光計（FT-IR）の反射法による測定技術開発を進めている。今年度は、反射率の組成依存性の決定と二酸化炭素測定可能性の検討を行った。更にこの方法を、2011年霧島新燃岳噴火と富士山の噴出物に応用した。新燃岳噴火では、カンラン石のガラス包有物から含水量1.6～5.5 wt%が求められ、飽和圧力250MPa、深さ約10kmに苦鉄質端成分のマグマが滞留していたことが推定され、噴火直前のマグマの物理化学条件に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]）。

（素過程に注目した支配要因の特定）

昨年に引き続き、始良カルデラ噴火（プリニー式噴火による大隅降下軽石及びその噴煙柱崩壊による垂水火砕流）の分析を行っている。本年度は、数センチサイズの軽石の見掛け密度を統計的に検討した。その結果、プリニー式大隅下部で平均0.65 g/cm³、大隅上部で平均0.76 g/cm³、垂水下部で0.66 g/cm³となり、噴煙柱崩壊直前には、見掛け密度が優位に増加したことがわかった。その結果、噴煙柱崩壊の支配要因として密度増加の可能性が出てきたが、この見掛け密度の違いが、昨年度の研究成果で得られた斑晶の存在度の違いによるのか、気泡の存在度の違いによるのか、今後特定する必要がある（九州大学大学院理学研究院[課題番号：2206]）。

今後の展望と課題

（地震発生の素過程）

高速滑りの摩擦強度に対して、ガウジの細粒化に伴って生成される非晶質が重要な役割をはたしていることがわかってきた。また、昨年度までの成果では、ガウジの粉砕によって生じる含鉄鉱物の酸化生成物が断層の強度に影響を与えることも示された。さらに、少なくとも有効法線応力が低い環境では、ガウジの粉体としての挙動が断層の巨視的な摩擦に大きな影響を与えている可能性が示された。地震発生予測のための数値モデルでよく使われる速度・状態依存摩擦則には、このような化学的あるいは粉体力学的な効果は十分に考慮されていない。そのため、今後これらの研究が進めば、より現実的な地震発生予測モデルの構築に貢献するであろう。また、このような化学的・粉体力学的な効果が発現するか否かは、水や酸素の分布あるいは有効法線応力など、摩擦滑りが起きる環境にも依存するので、地震発生予測モデルを構築する際には、断層の摩擦特性だけではなくどのような環境での地震発生を想定するのかを検討する必要があることを示唆する。

昨年度、アナログ物質をもちいた実験でいくつか興味深い成果が得られている。今年度もこれらの実験により新たな知見を探索する試みが行われ、一定の成果が得られた。しかし、えられた成果のいくつかは、現実の地震発生環境や地震観測帯域とは食い違う条件下で行われた実験に基づいている。地震発生場・発生条件の理解や地震観測データの解釈に役立てるためには、試料作成方法や実験装置に更なる工夫が必要であることもわかってきた。

南海掘削試料の解析からは、試料の組織や構造といった物質科学的な特徴と摩擦特性の間に一定の関係が見出されつつある。特に、半遠洋性泥とタービダイト起源の泥の違いは、プレート境界に沿った断層の動的挙動の違いに

一定の説明を与える可能性があり興味深い。今年度以降、現在掘削が行われている東北地方太平洋沖地震震源域でえられる試料でも同様の解析を行い、これまでの成果の普遍性や地域性を検証していく必要がある。

南アフリカ大深度鉱山での各種観測網の展開がほぼ完了した。極微小地震（AE）観測ではすでに大量のイベントの震源分布から地質断層に対応するクラスタが見出されるなど一定の成果があげられている。断層破損過程のその場計測や断層の透過波モニタリング、電場・磁場変動観測では、独自に開発した観測機材が十分な性能や信頼性を持っていることを示すデータがえられている。これらの観測は、今後1-2年で発生すると予想されているM2級の地震が、想定通りに観測対象の断層で起きれば、実験室でえられた断層の力学的性質のスケーリング則を確立するために重要な貢献をすると期待される。室内での一軸破壊試験で観測されたAEのコーナー周波数と応力降下量の関係が、自然地震のそれと同じスケーリング則に従うことを示した成果は、南アフリカ大深度鉱山での観測と対をなす成果である。今後、封圧下での破壊試験で同様の試みがなされれば、破壊のスケーリングについてより豊富な知見を提供することとなるであろう。

（火山噴火の素過程）

各課題の背後にはもちろん特定の火山噴火なり火山現象があるわけだが、素過程研究の特徴と利点は、むしろそうした特定の火山噴火にとらわれないあるいはそれを題材として、共通に働いている素過程を抽出しその基本的な仕組みと役割を理解することにある。それによって噴火の予知と推移予測のための基礎が提供されるからである。しかし、こうした普遍的理解だけでは、噴火予知・予測へ貢献できるところは少ないかもしれない。否、むしろ、せっかくの普遍的理解が、十分に活用されずただ蓄積されていくことは残念といえるであろう。それを避けるためには、現在でも着実に行われている観測データへの関連づけをより一層進めることが必要であろう。すなわち、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が、火山噴火素過程研究グループの今後の一つの役割であろう。それを如何にして行うかということが、具体的問題となる。一つの方策は、これまで提出されたあるいは提出しようとしているモデルを実際の噴火に応用し討論する場を設けることであろう。もう一つは、現在活動中の桜島や霧島火山での現象や観測データに焦点を当てて具体的な問題発見と解決を行っていくことであろう。こうしたことは既に個人プレイとしては行われているが、予知研究の中での素過程研究がより一層貢献するためには、組織的に行うことが必要であろう。そのためには、火山噴火素過程研究グループだけでなく、他の部会も合わせた噴火予知グループ全体として、組織や運営、全体のサイエンスプランの方向性について、今後検討していく必要がある。

成果リスト

- Akira, T., S. Yamasaki, H. Tsukada, Y. Takaku, S. Hisamatsu, and N. Tsuchiya, 2011, 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), 19-28.
- Dunheim, R. J., H. Ogasawara, M. Nakatani, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, Y. Yabe, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, and T. Satoh, 2011, Observational Studies of Earthquake Preparation and Generation to Mitigate Seismic Risks in Mines, S41D-058, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco.
- Fukuyama, E., F. Yamashita, and K. Mizoguchi, 2011, Voids strengthen rock friction at subseismic slip velocity, Abstract T42C-04, AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco.
- 東 修平・金川久一・井上厚行・高橋美紀, 2011, IODP Exp. 315 掘削地点 C0002 の付加体泥岩試料の鉱物構成・微細構造と破壊・透水特性との対応関係, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS035-P22, 幕張メッセ国際会議場.
- Hatano, T., 2011, Rheology and dynamical heterogeneity in frictionless beads at jamming density, *J. Phys. Conf. Ser.* 319, 012011.
- Hatano, T. and O. Kuwano, 2011, Origin of the velocity-strengthening nature of granular friction, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-011-0409-9.

- Hiraga, T., T. Miyazaki, M. Tasaka, and H. Yoshida, 2011, Comparison of microstructure of superplastically deformed synthetic materials and ultramylonite: Coalescence of secondary mineral grains via grain boundary sliding (invited), Fall Meeting, AGU, San Francisco.
- Hori, T. and H. Sakaguchi, 2011, Mechanism of decollement formation in subduction zones, *Geophys. J. Int.*, 187: 1089-1100, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05204.
- 堀内茂木・堀内優子・飯尾能久・佐々木祐樹・澤田義博・関根秀太郎・岡田知己・日野亮太・中谷正生・直井 誠・中村 洋光, 2011, 人間以上に高精度の地震波自動読み取りシステムの開発 (その2), 日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集, SSS028-01, 千葉
- 星出隆志・寅丸敦志・池端 慶・入山 宙, 2011, 新燃岳 2011 年噴火噴出物の斑晶・マイクロライト・発泡組織から見た, マグマ混合および上昇プロセス, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SVC070-P12, 千葉県幕張市.
- Ichihara, M., M. Takeo, A. Yokoo, J. Oikawa, and T. Ohminato, 2012, Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion, *Geophys. Res. Lett.*, 2011GL050542, in press.
- Ichihara, M. and J. Lyons, 2011, Laboratory modeling for generation of harmonic tremor in the ground and in the air, IGP/ERI Workshop, 18-19 October 2011: Auditorium, I.P.G. Paris: Imaging and Monitoring Active Subduction Zones and Volcanoes.
- 市原美恵・及川 純・大湊隆雄・武尾 実, 2011, 空振と地震の相関解析から見た霧島新燃岳 2011 年噴火の推移, 地球惑星科学関連学会合同大会, 幕張メッセ, 千葉, SVC050-07.
- 市原美恵・ライオンズ・ジョン, 2011, 地震と空振に見られる調和型微動の発生に関するモデル実験, 日本火山学会秋季大会, 旭川クリスタルホール, 旭川, B3-10.
- 梶原雅博・小川泰正・土屋範芳, 2011, 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), 167-180.
- 片山郁夫・東真太郎・武藤 潤, 2011, 海洋モホ面でのレオロジー的不連続性, *月刊地球* (受理) .
- 金川久一・東 修平・高橋美紀・井上厚行, 2011, 南海トラフ付加体のタービダイト起源泥岩と半遠洋性泥岩の力学的・水理学的性質の相違, 日本地質学会第 118 年学術大会, T17-O-14, 茨城大学.
- 川方裕則・吉光奈奈・中谷正生・J. Philipp・土井一生・直井 誠・T. Ward・G. Morema・V. Visser・S. Khambule・T. Masakale・A. Milev・R. Durrheim・L. Ribeiro・M. Ward・小笠原宏, 2011, M~2 の鉦山地震の発生が見込まれる断層を透過する弾性波のモニタリング—南アフリカ Ezulwini 金鉦山, 日本地震学会 2011 年秋季大会講演予稿集, D21-08, 静岡.
- Kawakata, H., N. Yoshimitsu, M. Nakatani, J. Philipp, I. Doi, M. Naoi, T. Ward, V. Visser, G. Morema, S. Khambule, T. Masakale, A. Milev, R. J. Durrheim, L. Ribeiro, M. Ward, and H. Ogasawara, 2011, Monitoring transmitted waves across a fault with a high potential for mining induced earthquakes - the Ezulwini gold mine in South Africa, Abstracts S31C-2257, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco.
- Kawamura, H., T. Hatano, N. Kato, B. Soumya, and B. Chakrabarty, Statistical physics of fracture, friction and Earthquake, *Rev. Mod. Phys.* (accepted).
- 北島光朗・星出隆志・寅丸敦志, 2011, 桜島火山大正噴火における, 噴火様式の変遷とマグマ結晶化過程, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SVC047-P03, 千葉県幕張市.
- 小森直昭・道林克禎, 2011, 夜久野オフィオライト待ちの山超マフィック岩体南部断層境界に発達したブロックインマトリックス構造, 静岡大学地球科学研究報告, 38, 21-26.
- Kinoshita, M., G. F. Moore, and Y. N. Kido, 2011, Heat flow estimated from BSR and IODP borehole data: Implication of recent uplift and erosion of the imbricate thrust zone in the Nankai Trough off Kumano, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AD18, doi:10.1029/2011GC003609.
- Kitamura, Y. and G. Kimura, 2012, Dynamic role of tectonic melange during interseismic process of plate boundary mega earthquakes, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2011.07.008.

- Kuwano, O. and T. Hatano, 2011, Flash weakening is limited by granular dynamics, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17305.
- Lin, W., S. Saito, Y. Sanada, Y. Yamamoto, Y. Hashimoto, and T. Kanamatsu, 2011, Correction to principal horizontal stress orientations prior to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki, Japan, earthquake in its source area, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L20309, doi:10.1029/2011GL049744.
- Masuda, K., T. Arai, K. Fujimoto, M. Takahashi, and N. Shigematsu, 2012, Effect of water on weakening preceding rupture of laboratory-scale faults: Implications for long-term weakening of crustal faults, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01307, doi:10.1029/2011GL050493.
- Masuda, T., T. Miyake, and M. Enami, 2011, Ultra-high residual compressive stress (>2 GPa) in a very small volume ($<1 \mu\text{m}^3$) of indented quartz. *American Mineralogist*, 283-287.
- McCarthy, C., Y. Takei, and T. Hiraga, 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 2. The universal scaling of polycrystalline materials. *J. Geophys. Res.*, 116, B09207, doi:10.1029/2011JB008384
- McCarthy, C. and Y. Takei, 2011, Anelasticity and viscosity of partially molten rock analogue: Toward seismic detection of small quantities of melt, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L18306, doi:10.1029/2011GL048776
- 武藤 潤, 2011, 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., M. and M. Ohzono, 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.
- Nagata, K., M. Nakatani, S. Yoshida, A revised rate- and state-dependent friction law obtained by constraining constitutive and evolution laws separately with laboratory data, *Journal of Geophysical Research*, in press.
- 中村美千彦, 2011, 火砕堆積物の解析から探る火山噴火のダイナミクス, *地質学雑誌*, 117, 329-343, doi:10.5575/geosoc.117.329.
- 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実験による石英非晶質化, 日本地質学会 118 年学術大会, 水戸.
- Nakamura, Y., J. Muto, H. Nagahama, T. Miura, I. Arakawa, and I. Shimizu, 2011, Physical processes of quartz amorphization due to friction. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Nakatani, M., 2011, Growing Dc in conservative slow laboratory friction (invited), ESF Research Conferences - Continuing Challenges in Earthquake Dynamics: New Methods for Observing and Modeling a Multi-Scale System, Obergurgl, Austria.
- Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, G. Kwiatek, T. Igarashi, and K. Plenkers, 2011, Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relation to the mainshock rupture and geological structures, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101 (5), 2399-2407, 2011, doi: 10.1785/0120100346.
- Noda, H., K. Kanagawa, T. Hirose, and A. Inoue, 2011, Frictional experiments of dolerite at intermediate slip rates with controlled temperature: Rate-weakening or temperature-weakening? *J. Geophys. Res.*, 116, B07306, doi:10.1029/2010JB007945.
- 小笠原宏・R Durrheim・中谷正生・矢部康男・A Milev・A Cichowicz・川方裕則・村上 理・直井 誠・森谷祐一・佐藤隆司・SATREPS 研究グループ, 2011, 南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験(2010 年), 鉱山での地震被害低減のための観測研究—日本と南アフリカの共同研究, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集, SSS029-07, 千葉.
- Ogasawara, H., R. Durrheim, M. Nakatani, Y. Yabe, A. Milev, A. Cichowicz, H. Kawakata, O. Murakami, M. Naoi, H. Moriya, T. Satoh, and SATREPS research group, 2011, Observational studies of earthquake preparation and generation to mitigate seismic risks in mines, IUGG, Melbourne, Australia.
- Okamoto, A., Y. Ogasawara, and N. Tsuchiya, 2011, Progress of hydration reactions in olivine-H₂O and orthopyroxene-H₂O systems at 250 C and vapor-saturated pressure, *Chemical Geology*, 289, 245-255.

- Okudaira, T. and N. Shigematsu, in press, Estimates of stress and strain rate in mylonites based on the boundary between the fields of grain-size sensitive and insensitive creep, *J. Geophys. Res.*.
- Onuma, K., J. Muto, H. Nagahama, and K. Otsuki, 2011, Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges. *Tectonophysics*, 502, 308-314.
- Plenkens, K., D. Schorlemmer, G. Kwiatak, and JAGUARS Research Group, 2011, On the probability of detecting picoseismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101 (6), 2579-2591, doi: 10.1785/0120110017.
- Sakaguchi, A., G. Kimura, M. Strasser, E. J. Screaton, D. Curewitz, and M. Masafumi, 2011, Episodic seafloor mud brecciation due to great subduction zone earthquakes, *Geology*, 39, 919-922, doi:10.1130/G32043.1.
- Setiani, P., J. Vilcaez, N. Watanabe, A. Kishita, N. Tsuchiya, 2011, Enhanced hydrogen production from biomass via the sulfur redox cycle under hydrothermal conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 10674-10682.
- Setiani, P., J. Vilcaez, N. Watanabe, A. Kishita, and N. Tsuchiya, 2011, Sustainable and enhanced hydrogen production from biomass through sulfur redox cycle using georeactor, *Geothermal Resources Council Transaction*, 35, 135-138.
- Shibazaki, B., T. Matsuzawa, A. Tsutsumi, K. Ujiie, A. Hasegawa, and Y. Ito, 2011, 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21305, doi:10.1029/2011GL049308.
- Shigematsu, N., K. Fujimoto, N. Tanaka, N. Furuya, H. Mori, and S. Wallis, in press, Internal Structure of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, revealed by borehole analysis, *Tectonophysics*.
- Susanto, A., N. Tsuchiya, E. Suparka, N. Hirano, A. Kishita, Y. I. Kusumah, 2011, Geology and surface hydrothermal alteration of Malabar area, northern part of the Wayang Windu geothermal field, Indonesia, *Geothermal Resources Council Transaction*, 35, 1029-1031.
- 鈴木由希・安田 敦・外西奈津美・金子隆之・中田節也・平林順一, 2011, 霧島山新燃岳 2011 年噴火噴出物の岩石学的特徴と時間変化, 2011 年火山学会秋季大会, A2-12, 旭川.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, A. Inoue, and K. Kanagawa, 2011, Difference in mechanical and hydrological properties between hemipelagic and turbidite mudstones cored from the Nankai Trough accretionary prism at Site C0002 of the IODP Expedition 315. AGU Fall Meeting, T21B-2337, Moscone Center, San Francisco.
- Takahashi, M., S. Azuma, S. Uehara, K. Kanagawa, and A. Inoue, 2012, Contrasting hydrological and mechanical properties between hemipelagic and turbidite muds from the shallow Nankai Trough accretionary prism, *International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones*, Poster #61, 高知市文化プラザかるぼーと.
- 高橋美紀・東 修平・上原真一・金川久一, 2011, IODP Exp. 315, Site C0002B より採取した付加体中泥岩の破壊および浸透率特性, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, S-SS35-29, 幕張メッセ国際会議場.
- Takahashi, M., S.-I. Uehara, K. Mizoguchi, I. Shimizu, K. Okazaki, and K. Masuda, 2011, On the transient response of serpentine (antigorite) gouge to stepwise changes in slip velocity under high-temperature conditions, *J. Geophys. Res.*, 116, B10405, doi:10.1029/2010JB008062.
- 高橋美紀・上原真一・高橋 学, 2011, 花崗岩を起源とする断層ガウジの剪断強度および水理特性, *Journal of MMIJ (資源と素材)*, 127, 165-168.
- Takei, Y., K. Fujisawa, and C. McCarthy, 2011, Experimental study of attenuation and dispersion over a broad frequency range: 1. The apparatus, *J. Geophys. Res.*, 116, B09204, doi:10.1029/2011JB008382.
- Tasaka, M., 2012, Grain-size sensitive creep of forsterite + enstatite aggregates, Doctoral thesis, The University of Tokyo.
- Togo, T., T. Shimamoto, and E. Fukuyama, 2011, Energy partition for grain crushing in quartz gouge during subseismic to seismic fault motion: an experimental study, Abstract T33F-2481 AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco.

- 寅丸敦志・市原美恵, 2011, Rayleigh-Plesset 方程式と流体系振動方程式のカップリング, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SVC047-08, 千葉県幕張市.
- 寅丸敦志・前田一樹, 2011, 実験間欠泉における噴出様式と噴出量の数理モデル, 日本火山学会 2011 年秋季大会, B3-11, 旭川市.
- Toramaru, A. and K. Maeda, 2011, Statistical characteristics of experimental geysers: Factors controlling mass and style of eruption, AGU fall meeting, V53A-2587, SanFrancisco, USA.
- Toramaru, A. and M. Matsumoto, 2012, Numerical experiment of cyclic layering in a solidified binary eutectic melt, *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JB008204.
- Tsuchiya, N. and N. Watanabe, 2011, Advanced direct use of geothermal energy for hydrogen production and material conversion, *Geothermal Resources Council Transaction*, 35, 143-146.
- Tsuji, T., Y. Ito, M. Kido, Y. Osada, H. Fujimoto, J. Ashi, M. Kinoshita, and T. Matsuoka, 2011, Potential tsunamigenic faults of the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Plants and Space*, 63, 831-834, doi:10.5047/eps.2011.05.028.
- Tsuji, T., R. Hino, Y. Sanada, K. Yamamoto, J.-O. Park, T. No, E. Araki, N. Bangs, R. Von Huene, G. F. Moore, and M. Kinoshita, 2011, In situ stress state from walkaround VSP anisotropy in the Kumano basin southeast of the Kii Peninsula, Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AD19, doi:10.1029/2011GC003583.
- Tsutsumi, A., O. Fabbri, A. M. Karpoff, K. Ujiie, and A. Tsujimoto, 2011, Friction velocity dependence of clay-rich fault material along a megasplay fault in the Nankai subduction zone at intermediate to high velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L19301, doi:10.1029/2011GL049314.
- 上原真一・嶋本利彦・松本拓真・新里忠史・岡崎啓史・高橋美紀, 2011, 地下深部における新第三紀泥質軟岩中の亀裂の透水特性～室内試験による推定～, *Journal of MMIJ (資源と素材)*, 127, 139-144.
- Ujiie, K., A. Tsutsumi, and J. Kameda, 2011, Reproduction of thermal pressurization and fluidization of clay-rich fault gouges by high-velocity friction experiments and implications for seismic slip in natural faults, *Geology of the earthquake source*, Geological Society, London, Special Publications, 359, 267-285.
- Wada, J., K. Kanagawa, M. Nakatani, H. Mochizuki, T. Hirose, J. Ando, N. Furukawa, and A. Inoue, 2012, Amorphization of dolerite gouges and its effects on their frictional properties. International Conference on a New Perspective of Great Earthquakes along Subduction Zones, Poster #109, 高知市文化プラザかるぼーと.
- 渡辺 了, 2011, 地殻プロセスにおける流体の役割, *ながれ*, 30, 311-316.
- Watanabe, N., T. Ishibashi, N. Hirano, Y. Ohsaki, Y. Tsuchiya, T. Tamagawa, H. Okabe, and N. Tsuchiya, 2011, 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), 683-691.
- Watanabe, T., Y. Shirasugi, H. Yano, and K. Michibayashi, 2011, Seismic velocity in antigorite-bearing serpentinite mylonites, Geological Society, London, Special Publication, 360, 97-112.
- Yamaguchi, A., A. Sakaguchi, T. Sakamoto, K. Iijima, J. Kameda, G. Kimura, K. Ujiie, F. M. Chester, O. Fabbri, D. Goldsby, A. Tsutsumi, C.-F. Li, and D. Curewitz, 2011, Progressive illitization in fault gouge caused by seismic slip propagation along a megasplay fault in the Nankai Trough, *Geology*, 39, 995-998.
- 山下 太・福山英一・溝口一生・東郷徹宏・御子柴正・佐藤 誠・箕輪親宏, 2011, 防災科学技術研究所大型耐震実験施設の大型振動台の準静的制御性能について, 防災科学技術研究所研究報告, 第 79 号, 9-23.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, and K. Mizoguchi, 2011, Contact state monitoring of simulated faults at various slip rates by electrical conductivity experiments, Abstract T33F-2487 AGU 2011 Fall Meeting, San Francisco.
- 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, 2011, 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), 315-323.

- 安田 敦, 2011, 顕微FT-IR 反射分光法による斑晶ガラス包有物の含水量測定, 火山, 56, 2-3, 41-49.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, and N. Takahashi, 2011, Estimation of the seismic moment and the corner frequency with continuous broadband AE records in a fracturing rock sample, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, S41C-2204, San Francisco.
- 吉光奈奈・川方裕則・高橋直樹, 2011, 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, 日本地震学会秋季大会, B32-09, 静岡.
- 吉光奈奈・川方裕則・中谷正生・J. Philipp・直井 誠・土井一生・T. Ward・V. Visser・G. Morema・S. Khambule・T. Masakale・A. Milev・R. J. Dunheim・L. Ribeiro・M. Ward・小笠原宏, 2011, 南アフリカ金鉱山の断層近傍における地震波干渉法により推定したグリーン関数と透過弾性波記録の比較, 日本地震学会 2011 年秋季大会予稿集, P2-57, 静岡.
- 吉光奈奈・川方裕則・柳谷俊, 2011, 岩石圧縮試験における広帯域連続集録から得られた AE の震源特性, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, SSS025-16, 千葉.
- Yoshimura, S. and M. Nakamura, 2011, Carbon dioxide transport in crustal magmatic systems, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 307, 470-478, doi:10.1016/j.epsl.2011.05.039.
- Zhang, S., F. Jin, X. Zeng, J. Hu, Z. Huo, Y. Wang, N. Watanabe, N. Hirano, and N. Tsuchiya, 2011, 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, 8878-8884.

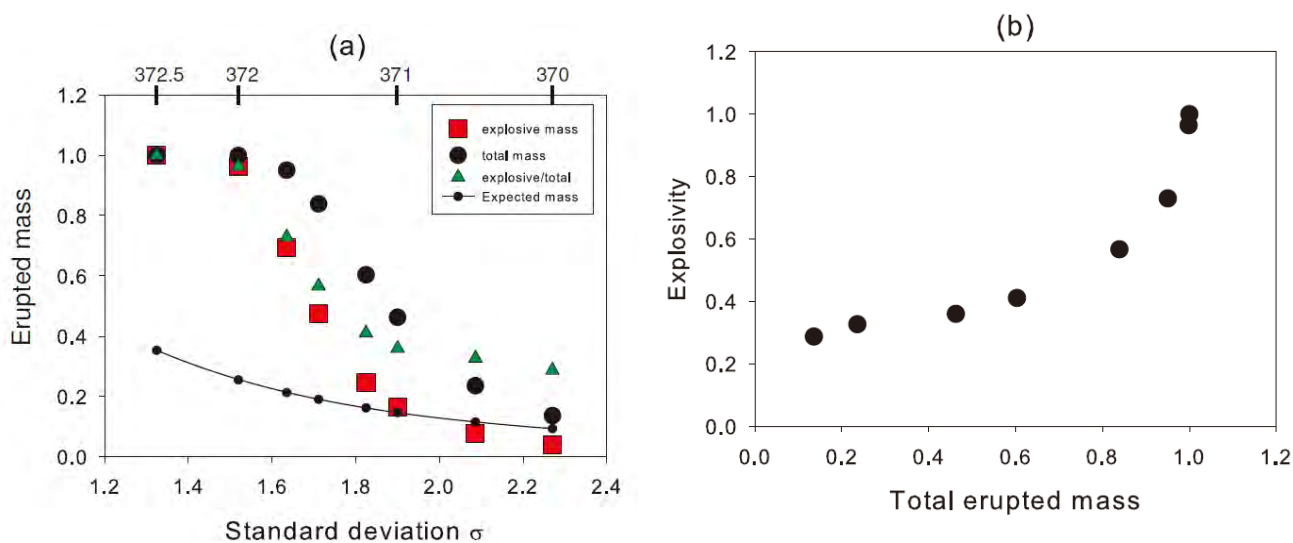


図1 シミュレーション結果。(a)温度PDFの標準偏差(下横軸)と平均温度(上横軸)の関数としての、総噴出量(黒丸)、爆発的噴出量(赤四角)。(b)総噴出量と爆発性。温度PDFの揺らぎが大きくなるほど噴出量と爆発性が小さくなる。これらの関係は、間欠泉実験で得られた結果と定性的に一致する。

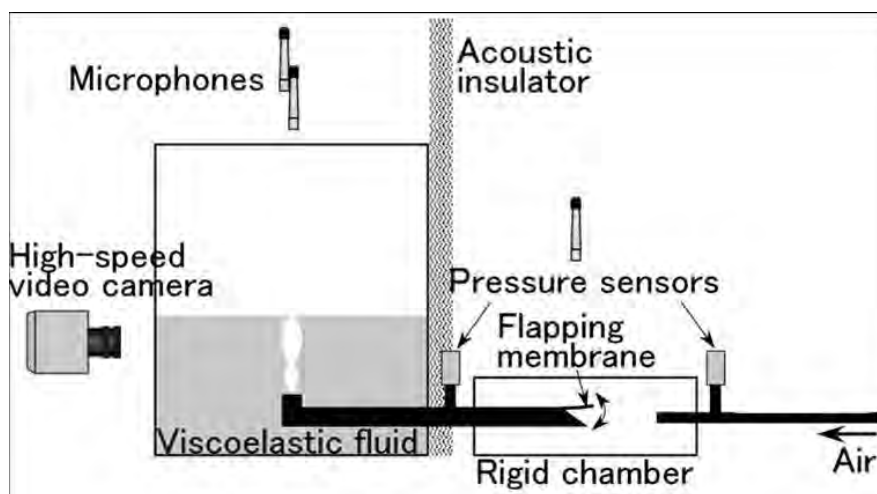


図2 調和振動型の地震・空振を再現するモデル実験。Flapping membraneが周期的に振動することで液中に気泡が周期的に中にされる。液体の粘弾性的性質と流量とのカップリングで気体の上昇モードが変化する。