

2 (4) 地震発生・火山噴火の素過程

地震発生・火山噴火の素過程計画推進部会長 矢部康男
(東北大学大学院理学研究科)
同計画推進部会委員 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。室内実験の知見を時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ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。火山噴火過程の多様性を支配する要因を明らかにし、噴火の推移を正確に予測することを目指した実験的・理論的研究を行った。

火山噴火素過程研究は、今次の予知研究から新たに始まった課題であり、予知研究の中での位置づけや役割について共通認識があるわけではない。そのことを踏まえて、この報告では、個々の研究課題の素過程との関わり方に視点を置いて、予知研究の中での各研究課題の成果を整理してみたい。

ア．岩石の変形・破壊の物理的・化学的素過程 (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より系統的に行い、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])。

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するため、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を行った。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、強烈的な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、高速域での強烈的な速度強化が、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 (東京大学地震研究所 [課題番号:1427])。

(中速・高速摩擦特性)

アラスカのコーディアックメランジで採取した付加体泥岩を用いた中・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])。

南海掘削の深さ約 270 m でえられた 2 つの粘土質断層試料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知れない（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

室温から 1000 までの背景温度で中速すべり実験を行った。400 までは温度の上昇にともない摩擦強度が低下したが、400～800 では、温度上昇にともない摩擦強度が増加した。さらに 1000 まで温度を上げると摩擦強度は再び低下した（Kanagawa et al., 2010）。摩擦により生成されたガウジの X 線回折分析から、温度 800 までの摩擦強度は、ガウジ中の非晶質物質の含有量と負の相関があることがわかった。一方、800 から 1000 への温度上昇に伴う強度の低下は、軌跡の酸化分解反応生成物の粒状流動に起因していることが、実験後の断層面付着物の微細構造観察と結晶方位解析から明らかになった。摩擦強度の背景温度依存性は大きく、従来観察されている、すべり速度の増加に伴う摩擦強度の著しい低下に対しても、摩擦発熱による温度の上昇が寄与している可能性がある（東京大学地震研究所・千葉大学 [課題番号：1427]）。

回転式高速摩擦試験機の回転側サンプルにつけた 10 個のセンサーから信号が取り出せるよう、試験機を改造した。これにより、実験中も、断層をまたいだ測定データを得られるようになった。改造によって試験機の特性が変化していないことを確かめた後、高速すべり中の断層の弾性波透過率や電気伝導度の法線応力依存性を調べた。暫定的な解析では、低速摩擦で強度が増すと弾性波透過率も増えるのとは逆に、高速摩擦では、強度が増すと透過率が減少することが明らかになった。このことから、低速摩擦と高速摩擦では、摩擦の素過程が異なることを示唆する（防災科研 [課題番号 3015]）。

（透過弾性波試験）

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的に推定できるわけではないことが明らかとなった（東京大学地震研究所 [課題番号：1427]）。

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（京都大学防災研究所 [課題番号：1814]）。

三軸圧縮試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 の帯域での減衰係数 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ー解析を行った。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ーの分解能は 10mm 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]）。

（岩石・水相互作用）

断層バルブモデル（例えば、Sibson *et al.*, 1988）の妥当性を検証するために、地殻内の亀裂を上昇する流体からの鉱物の析出に関する熱力学的シミュレーションを行った。鉱物の析出がもっとも顕著なのは、地殻の温度とは無関係に初期モデルに与えた圧力勾配が最大の所であり、断層バルブモデルで主張されているように、地震発生層最下部（温度～300 の深度）でバルブが形成される必然性がないことが明らかになった。今回行ったシミュレーションでは、溶媒として純水を仮定したが、昨年度の成果で、より一般的な地殻流体である H_2O -NaCl 系の流体では、300-400 で石英や白雲母が急激に沈殿する可能性があることが分かっている。断層バルブモデルの妥当性をさらに検証するためには、今後、塩水溶媒の物理化学特性を明らかにする必要がある（東北大学 [課題番号：1214]）。

断層バルブモデルの理論的検証と平行して、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中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（今年度は Al について実験）の濃度に依存していることが明らかとなり、その析出速度式を策定することが出来た（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と数分間のものがあった。前者は、シリカ鉱物の析出による流路の閉塞、後者は破碎したシリカ鉱物が引っかかること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）

地殻流体との物理化学的相互作用により岩石の強度が低下し、塑性変形が促進されと考えられている。しかし、どの程度の水が存在すれば下部地殻岩石の軟化が生じるのかは未だ明らかではない。そこで、下部地殻の代表的構成岩石である斜長岩のレオロジーにおける水の影響を調べるため、下部地殻の温度圧力条件（封圧 1.2 GPa、900 ）で変形実験を行った。含水量が 0.2 wt% の実験では、乾燥状態にくらべて顕著な軟化は見られなかったが、鏡下においては、試料表面部分に局在した著しい塑性変形が認められた。この部分が強い格子定向配列（LP0）を持つことから、表面に拡散した水が局所的な塑性変形を促し、塑性ひずみが表面に集中したと考えられる。一方、約 1 wt% の実験では、強度が著しく低下した。回収した試料には強い LP0 の発達に加え、多数のクラックが認められた。このことは、下部地殻の温度圧力条件下では 1 wt% の水が、斜長岩の水圧破壊を引き起こす可能性を示している（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を発達させたことがわかった。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。来年度、これらを含む岩石の変形実験と音速測定を同時に行うための装置の改造・調整を行い、その再現性を確かめるため、今年度は、メノウとフリントを用いた基礎実験を行った(植田・道林, 2010)(東京大学地震研究所・静岡大学[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ータのマッピングを完成させた(産総研[課題番号: 5010])。

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])。

(地震発生に伴う電位変化)

模擬断層にガウジをはさんだ三軸圧縮試験では、断層が先駆的にゆっくりと滑る際に、摩擦静電気によると思われる電位が発生することを明らかにした(Onuma et al., 2011)(東北大学[課題番号: 1215])。

石英等の圧電効果により、岩石破壊に先行して電位変化が生じることが、これまでに室内実験で観察されている。石英の結晶軸の方位がそろっていない時には、このような電位変動の振幅が、破壊の規模によってどのようにスケールされるのかを明らかにするため、南アフリカ大深度金鉱山のひとつである Ezlwini 鉱山の地下約 1000 m で、高感度のボアホールアンテナを用いた観測を開始した。これまでに、断層破壊そのものに起因する電位変動は捉えられていないが、地震波の伝播により励起されたと見られる信号を計測することに成功した。アンテナから 90 m 程度離れた地震計で観測した波形と比べると、アンテナで観測された電位信号波形は、地震波の速度波形と類似していた(東京大学地震研究所[課題番号: 1427])。

(摩擦の微視的過程)

地震サイクルにおいて大部分の期間をしめる低速すべりが、脆性的な性質と流動的な性質をあわせもつという重要な特徴は、鉱物硬度オーダーの局所的な高压下における真実接触部分での固体流動現象が基礎になっている。そこで、点接触変形に関する基本的な知見を得るため、モース硬度が 1・9 の各鉱物の点接触変形試験を行った。点接触変形の加重・圧痕深さ・変形エネルギーの間には系統的な関係が認められた。岩石摩擦の時間的性質はこれまで、主として花崗岩を用いて調べられてきたが、今回発見した加重・圧痕深さ・変形エネルギーの関係を用いれば、特定の岩種で調べられた摩擦則を他の岩種に拡張することが出来るであろう(静岡大学[課題番号: 2910])。

イ．地殻・上部マントルの物性の環境依存性

(巨視的弾性定数の予測モデル)

複合媒質の巨視的弾性定数の計算には、一般に、Voigt 平均や Reuss 平均が用いられる。これらの手法は、鉱物粒子の形状や配列を考慮していないので、それぞれ、巨視的弾性定数の上限と下限を与えるに過ぎない。カンラン岩のように、構成鉱物の異方性や鉱物種間の物性コントラストも小さい場合には予測される上限と下限の差が小さく、推定の不確かさは小さい。しかし、構成鉱物の異方性が強く、また、鉱物種間の物性コントラストが大きい蛇紋岩では、上限と下限の差が大きいので、蛇紋岩の弾性定数を正確に予測するための計算手法をあらたに開発する必要がある。その準

備として今年度は、蛇紋岩試料中のオリビンやアンチゴライトの結晶方位分布とこれらの単結晶の弾性定数を用いて推定した弾性波速度と実測の弾性波速度を比較した。実測値は、予測範囲の下限を与える Reuss 平均の予測とよい一致を示した。この傾向は、蛇紋岩の面構造に垂直に伝播する波において顕著である。さらに、固体圧変形試験機内でせん断変形させた蛇紋岩試料内の鉱物粒子の結晶方位を測定して、弾性波速度異方性に対して変形が及ぼす効果を調べた。鉱物粒子の方位測定には SEM-EBSD 法を用い、試料表面の処理法を工夫することで、アンチゴライトの結晶方位解析法を確立した。蛇紋岩は、わずかなひずみにより地震波異方性が著しく強くなった。この結果を沈み込み帯に適用すると、沈み込むスラブの角度によって、蛇紋岩の異方性が地上での地震波速度観測に影響することが予想される（東京大学地震研究所・富山大学 [課題番号：1428]）。

15 km 以深の地殻の地震波速度は、岩石を、鉱物の単結晶の組み合わせとして考えた時の速度で説明可能である。一方、深さ 15 km から地表にかけては、一般に、浅くなるにつれて地震波速度は緩やかに減少する。これは、15 km 以浅の速度構造と理想的な岩石の弾性波速度からのずれが、浅くなるにつれて顕著になることを意味している。この原因が、岩石で普遍的に観察される鉱物粒間のクラックの発達にあるとする仮説を立て、その検証のための実験・計算を行った。地殻の主要構成鉱物である石英の高緻密多結晶体を合成することが出来なかったため、実験には、クラックをほとんど含まない天然のメタチャートを使用した。メタチャートを加熱すると、温度の上昇とともにクラックが増加し、最終的にはほぼ 100% の粒界にクラックが生じた。クラックの平均長さは、粒界クラックの生成が、温度や圧力の変化に伴う異方的な鉱物粒子の変形ミスフィットによるものであるとしたモデル計算とよく一致した。天然岩石の弾性波速度とクラック密度の関係を調べたところ、両者の関係は Hudson's model によって記述できることがわかった。適当な温度・圧力の深さ分布を仮定して、実験結果を適用したところ、地殻の弾性波速度分布が、粒界クラックの発達度の深さ分布で説明できた（東京大学地震研究所 [課題番号：1428]）。

（多結晶体の非弾性特性）

昨年度に開発した、非弾性特性をきわめて広い帯域（0.1 mHz-100 Hz）で測定可能な実験装置を用いて、有機物多結晶体（上部マントルにあるオリビンのアナログ物質）のヤング率と減衰の周波数・温度・粒径依存性を調べた。周波数を、物質のマックスウェル周波数で規格化すると、減衰の周波数依存性（緩和スペクトル）は、温度や粒径に依存しないひとつの関数で表せることがわかった。同様に規格化されたオリビン多結晶体の緩和スペクトルも同一の関数で表せる。このことから、多結晶体の非弾性特性は物質によらない普遍性があると考えられる。しかし、これまでに明らかになっている多結晶体の緩和スペクトルの帯域は、規格化された地震波帯域よりも数桁低周波であるため、実験結果を自然地震観測に適用するためには、非弾性の適切なモデル化が必要である（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

（M2 級地震の余震解析）

南アフリカ大深度金鉱山のひとつであるムボネン金鉱山の地下約 3.3 km において発生した地震（Mw1.9）の余震群のマグニチュードを推定した。観測に用いた AE センサーは、高周波まで感度が高いものの、複雑な周波数特性を持っているので、これまで、電圧出力を物理量に変換することが出来なかった。観測に用いた AE 観測網には、周波数特性が明らかな三成分加速度計も埋設されていた。そこで本年度は、加速度計でも明瞭な信号が記録されている帯域に絞って AE センサーと加

速度計の記録を比較して、AE センサーの電圧感度校正を行い、余震のマグニチュードを決定することに成功した。余震の規模別頻度分布は Gutenberg-Richter の関係にしたがっており、観測網の中心から 100 m 以内では $M_w = -4$ までの地震がもれなく検知できていたようである。余震群は 5 つの明瞭な空間的クラスターに分類できる。それぞれのクラスターに対して b 値を推定したところ、本震破壊面に沿って 2 次元的に分布するクラスターのみが高い b 値 (1.41) を示した。同時に、より大規模な AE 観測網をイズルウィニ金鉱山やモアブ・コツォン金鉱山に展開中である (立命館大学 [課題番号: 2402])。

(実験室での AE 観測)

花崗岩試料と砂岩試料を用いて、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、三軸伸張 (軸圧が封圧よりも小さい) 試験を行った。試験開始から終了までにわたって、試料の微小破壊に伴って放射される弾性波 (AE) を連続で観測した。三軸伸張試験でも、初動が全て押しの微小破壊 (開口型) だけではなく、押し引きが混在したものも観測され、せん断型の微小破壊も発生していることが示唆された。一軸圧縮試験では、これまでに例のない、広帯域センサーを用いた長時間連続収録に成功した (立命館大学 [課題番号: 2402])。

(高周波波動生成過程)

天然の断層の破壊に伴って放射される高周波強震動の生成過程を直接観測するために、25 kHz までフラットな周波数特性を持ち、最大 500 G まで観測可能な三成分加速度計を、イズルウィニ金鉱山の地下約 1 km に埋設した。これまで鉱山地震観測に用いられてきた加速度計の容量は 50 G であり、今回埋設したものより 1 桁小さい。また、従来の加速度計の孔軸方向と孔径方向の成分の周波数特性には、防水・耐圧容器の形状の縦横比が大きいことに由来する異方性があった。今回、この問題を解決するために、縦横比を 1 に近づけるように設計した防水・耐圧容器を新たに作成した。室内実験での検定により、両者の周波数特性が一致することを確認した (東北大学 [課題番号: 1215])。

(断層面外亀裂の再現実験)

地震時破壊エネルギーの規模依存性は、地質学的ずれ変位の大部分をまかなう成熟した断層のコア部分から分岐した多数の副次断層の形成によっている可能性がある。そこで、既存弱面を持つアガロースゲルの破壊実験により、副次断層の形成を再現する実験を行った (Kuwano, 2010)。種々の模索の結果、弱面の固着度をコントロールする手法を確立し、様々な程度の副次断層 (面外亀裂) を発生させることに成功した。副次断層は、主断層の破壊先端近傍の引張場側だけに発生した。まだ、副次断層の生成中は主破壊の伝播速度が低下した。破壊伝播に伴うエネルギー解放率と副次断層を含めた破壊表面エネルギーとの関係はグリフィスの破壊基準をほぼ満たしており、アガロースゲルの破壊は、地震時の動的破壊と同じ力学的枠組みに沿ったものであるといえる (東京大学地震研究所 [課題番号: 1427])。

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)

観測データからマグマ本体の情報を引き出すには高度なモデル化が必要である。火道内マグマおよび火山性ガスの上昇・下降を反映している山体膨脹・収縮現象に対する山体地形の影響を評価す

ることはその一例である。2次元の有限要素法を用いて評価した結果、山体の傾斜角が大きくなるに従い、変位・傾斜量の最大値が現れる位置は火口中心に近くなり、最大の変位量や傾斜量は平坦な地形の場合に比べて2～5倍大きくなり、測地データから火道内マグマの実態を推測する際には、地形を適切に考慮しなければならないことが分かった(東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。また、前兆現象としての火山性微動データから流体亀裂の振動を読み解くには、矩形・扁平楕円体など亀裂形状の影響を評価することが必要である。亀裂の形状を考慮して流体亀裂振動・火道振動からの弾性波放射特性の検討を行った結果、高次の振動モードにおいては、亀裂先端での変換・放射が顕著になることが分かり、亀裂と地表面との相互作用による表面波励起などの効果をさらに検討する必要性が示された(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)

マグマという、力学的に複雑な性質を示す物質において、噴火の爆発性を左右している脱ガスの機構を明らかにすることは素過程研究の大きな目標の一つである。その視点に立って、マグマの脆性破壊と火道浅部での脱ガスの関係を明らかにするために、発泡した流紋岩質マグマの高温封圧下での剪断変形実験を世界で初めて行った。その結果、(a)気泡を含まないマグマに比べ、脆性破壊がより低粘性(高温あるいは高含水量=火道深部)から開始し、(b)破壊面近傍での圧密とそれに伴う脱ガスが生じることを明らかにした。さらに、マグマ破断面の癒着(ヒーリング)実験を世界で初めて行い(図1)、癒着の速度がメルトの粘性変形によって律速されることを突き止めた。その結果、癒着に要する時間スケールは亀裂が脱ガスの通路として働くのに十分であり、典型的な浅部火山性地震の発生間隔と一致することから、火山性地震と脱ガス、メルトの脆性破壊と癒着、の関係についての示唆を得た。また、二酸化炭素に富んだ流体とマグマとの相互作用(CO_2 fluxing)によって気泡の成長が促進され、噴火がトリガーされる可能性を実験的に示した(東北大学理学系研究科[課題番号:1216])。

噴出様式および噴出量を支配しているプロセスについて、間欠泉アナログ実験によって長期予測と短期予測の観点から検討した(九州大学大学院理学研究院[課題番号:2206])。噴出量の長期的振る舞いについては、爆発的噴出(Jet)としての噴出量の平均値に注目すると、過熱速度(superheating rate, マグマの場合の過飽和増加速度に対応)が大きくなるほどその値は減少することが分かった(図2左)。噴出様式の長期的統計的振る舞いについては、過熱速度が小さいときは、Jetがいつも起こるが、ある値よりも大きくなると確率的に非爆発的噴出(Flow)が起こることが分かった(図2右)。このことは、過熱速度と熱輸送モード(核沸騰輸送と対流輸送の相対的寄与)との関係、さらに熱水だまり内での過熱度の時間的空間的不均一性の関係を仮定すると、整合的に解釈できる。また、噴出様式・噴出量の短期予測の原理を模索するために、噴出前の湯だまり内で起こっている温度・圧力変動を測定し、同期させた高速カメラ映像でその気泡発生との関係を観察した結果、その励起源(圧力パルス)が1つの気泡の核沸騰であることを明らかにした。核沸騰と過熱速度の関係を考慮すると、前駆圧力振動あるいは微動とその励起源の確率的振る舞いが、それに続く噴出様式と噴出量に関係している可能性が明らかになった。

(複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明)

爆発現象に伴う音波の放射は複数の要素の複雑な組み合わせからなる。そうした複雑現象の本質的側面である気泡の振動と容器の共鳴の相互作用を調べるために、実験室に置いて管の中の液面の高さを連続的に時間変化させ、空気中で計測される音波のスペクトルの時間変化を見た。その時間

変化の特徴を詳細に検討し素過程を整理して有限要素法によりシミュレーションした結果、実験結果を再現することに成功した。また、乱流ジェットによる発生音波と容器の共鳴の相互作用を調べるために、実験装置を工夫し、連続噴煙のスペクトルを計測した。平成 23 年 1 月に始まった霧島山新燃岳噴火において、これまで得られた室内実験の結果を応用するために空振観測の強化と観測データの解析、地震波形との相互関係の解析を行った（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）

噴火前のマグマに溶解している揮発性成分量についてデータを蓄積することは噴火の爆発性の潜在能力を統計的に知るために重要である。そのための一つの拠り所として、噴出物に含まれる斑晶のガラス包有物中の揮発成分量がある。顕微赤外分光計（FT-IR）を用いて、ガラス包有物を分析する際にはその周辺の斑晶そのものの分析値への寄与を適切に評価する必要がある。この研究では、そのガラス包有物分析のための「斑晶量補正方法」をかんらん石について開発し、揮発性成分量のデータ蓄積のための基礎技術を確立した（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）

噴火様式推移の支配要因を特定するためには、素過程研究の結果を利用した方法論を用いて、過去の噴出物からマグマの運動やマグマの状態を定量的に推定する必要がある。プリニー式噴火から溶岩流へと噴火様式が変化した桜島大正噴火、およびプリニー式噴火から噴煙柱崩壊による火砕流へと移行した始良カルデラ噴火（大隅降下軽石および垂水火砕流・入戸火砕流）のサンプリングを行い分析した結果、一回の噴火における噴火様式の遷移は、噴火直前での温度・結晶度・揮発性成分の過飽和度のマグマだまり空間構造にあることを示唆する予察的な結果を得た（九州大学大学院理学研究院 [課題番号：2206]）。

課題と展望

地震発生の素過程については、アナログ物質を使った実験が興味深い成果をあげている。適切なアナログ物質を使えば、岩石では大がかりな装置が必要になる温度や圧力等の条件下でのレオロジーを、比較的簡便な装置で測定することが出来る。今後、実験に用いるアナログ物質の種類を増やすことで、より多様な条件下での岩石レオロジーに関する知見が得られるものと期待される。一方で、アナログ物質を用いた実験で得られる知見の妥当性を検証するため、岩石を用いた実験で実現可能な条件範囲を広げていく努力も欠かせない。

断層面の弾性波透過率や電気伝導度の計測、光学的手法による断層面の直接観察などにより、これまで概念的にしか理解されていなかった断層の固着度に対して物理的解釈を与える試みが進んでいる。これまでの成果では、固着度の物理的実体は予想以上に複雑であることが示された。一方で、高速摩擦実験では、断層の摩擦特性が雰囲気依存することが示唆された。固着度の物理的実体解明の困難さはこのようなことにも起因しているのかも知れない。今後、高速摩擦だけではなく低速摩擦実験においても制御された雰囲気のもとで実験を行い、このことを検証していく必要がある。このような研究により、断層固着の物理的実体を明らかに出来れば、地震波干渉法などによって検出されることが期待される地震断層を透過する実体波から、断層の強度をリアルタイムで連続的にモニタリングするための基本原理を提示できるであろう。

天然の断層は、室内実験で用いられる人工断層面とは異なる不均質をもつと考えられている。天然の断層における摩擦構成則を直接明らかにするため、鉾山地震の断層直近観測を行っている。一

方で、断層摩擦のもっとも基本的な素過程の一つである岩石の微視的接触変形の一般的な性質を明らかにするため、様々な鉱物を用いた微視的接触変形実験が行われた。今後、この成果を、断層面接触の数値モデル（例えば、Yoshioka and Iwasa, 1996）に導入すれば、任意の不均質をもつ断層面の摩擦挙動を予測することが出来るようになるであろう。

岩石・水相互作用の理論的研究からは、断層帯内に高圧間隙水をもたらす有力なメカニズムと考えられている断層バルブモデルの成立には、地殻流体の化学組成が重要な鍵を握っている可能性が示された。また、実験的研究からは、バルブの形成には、特徴的時間が大きく異なる複数のメカニズムがあることが示された。このような研究は、断層強度の時間変化について、摩擦構成則とは異なる観点から手がかりを与えるものである。岩石の摩擦特性を、岩石の接触だけではなく、より多角的に捉える努力を続けていくことが重要である。

断層破壊やその準備過程における電位変化のメカニズムが実験的に明らかになってきた。また、実験室でえられた知見の地質断層への適用可能性の検証も始まった。地震発生先行過程部会と協力してこれらの研究を進めることにより、地震発生の直前予知の実現可能性を検討することは、予知研究の成果の実用性の観点から重要であろう。

火山噴火の素過程に関する個々の研究課題の展望と課題は、各課題の年度末報告書の中で述べた通りである。ここでは、火山噴火素過程研究全体を通じての取り組みの現状と今後の展望について述べる。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。こうした視点から、それぞれの課題を素過程との関わり方で整理すると、1)素過程に関係づけた観測量解釈の高度化、2)素過程の評価と役割、3)複雑現象における素過程の整理とメカニズムの解明、4)素過程データ抽出のための技術開発、5)素過程に注目した支配要因の特定、ということになる。このように、これまでの研究は素過程研究の特徴を生かした成果を出してきていると評価できるが、素過程の仕組みそのものを理解するための研究がもう少し多くてもよい。研究の手法としては、観測のみならず実際のマグマやアナログ物質を用いた室内実験を行うことも素過程研究の特徴である。再現することが難しい複雑な天然現象を、そこから素過程を抽出し、マグマや類似物質を用いて実験室で再現することは素過程研究の利点であり、これまでの研究課題はこの方向性に沿った研究を行ってきている。今後は、この点をさらに推し進めて、地質学的・地球物理学的観測量の解釈と実験室での素過程の理解を橋渡しする試みが必要になってくるであろう。特に、1万年に一度の超巨大カルデラ噴火を視野に入れた研究が必要であろう。1万年に一度の噴火であっても、マグマだまりや火道の中で起こっている過程は、マグマの結晶化・発泡や脱ガスといった共通して起こる素過程であり、時間空間スケールと物性量をうまくスケールリングすることによって、こうしたまれにしか起こらない超巨大噴火の予知と推移予測に素過程研究の成果を少なからず応用できるはずである。

参考文献

- Fukuyama, E and K. Mizoguchi, 2010, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics based on high-velocity friction tests with variable sliprate, *Int. J. Fracture*, 163, 15-26.
- Gu, X., X. Xie, X. Wu, J. Lai, K. Hoshino, and G. Zhu, 2010, Ferrosepiolite, IMA2010-061, CNMCN Newsletter, in press.
- Hatano, T., 2010a, Constitutive law of dense granular matter, *J. Phys. Conf. Ser.*, 258, 012006.
- Hatano, T., 2010b, Critical scaling of granular rheology, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 184, 143.

- Hirauchi, K., K. Michibayashi, H. Ueda, and I. Katayama, 2010, Spatial variation in antigorite fabric across a serpentine subduction channel: Insight from the Ohmachi Seamount, Izu-Bonin frontal arc, *EPSL*, 299, 196-206.
- Harigane, Y., K. Michibayashi, and Y. Ohara, 2011, Relicts of deformed lithospheric mantle within serpentinites and weathered peridotites from the Godzilla Megamullion Parece Vela Back-Arc Basin, Philippine Sea, Island Arc, in press.
- Harigane, Y., K. Michibayashi, and Y. Ohara, 2010, Amphibolitization within the lower crust in the termination area of the Godzilla Megamullion, an oceanic core complex in the Parece Vela Basin, Island Arc, 19, 719-730.
- Hiraga, T., Y. Miyazaki, M. Tasaka, and H. Yoshida, 2010, Mantle superplasticity and its self-made demise, *Nature*, 468, 1091-1094.
- Hirano, N., K. Yamamoto, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2010, Observation of quartz fracturing under the hydrothermal condition using visible type autoclave, *Water-Rock interaction*, 13, 653-656.
- Hayashi, N and A. Tsutsumi, 2010, Deformation textures and mechanical behavior of a hydrated amorphous silica formed along an experimentally produced fault in chert, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, doi:10.1029/2010GL042943.
- 市原美恵・ヴィダル・バレリー, 泡のぶくぶく現象における音源と容器の共鳴の相互作用, 日本火山学会秋季大会, 2-A13.
- 市原美恵・ヴィダル・バレリー, 泡のぶくぶく音の発生メカニズムとそのパターン, 九州大学応用力学研究 所研究集会「地形のダイナミクスとパターンとその境界領域」.
- Ichihara, M. and Rubin, M.B., 2010, Brittleness of fracture in flowing magma, *J. Geophys. Res.* 15, B12202, doi:10.1029/2010JB007820.
- 井元恒・道林克禎, 2010, 1GPa, 800°C におけるメノウ中の石英多結晶体の結晶成長実験, 静岡大学地球科学 研究報告, 37, 13-19.
- 金川久一・岩邊香苗・東修平・中谷正生・望月裕峰, 2010, IODP Exp.315 で採取された南海トラフ付加体浅 部泥岩試料の摩擦挙動, 日本地質学会第 117 年学術大会講演要旨, 226.
- Kanagawa, K., H. Noda, T. Hirose, and A. Inoue, 2010, Effect of background temperature of the frictional strength of dolerite at an intermediate slip rate, *Abstracts of the Workshop on Physico-chemical Processes in Seismic Faults*, 43, Padova, Italy.
- 金川久一・野田博之・廣瀬丈洋・井上厚行・海野知子, 2010, ドレライトの中速域における摩擦強度の背景 温度依存性, 地球惑星科学連合 2010 年度連合大会予稿集, SSS020-02.
- Kitamura, K., M. Takahashi, M. Mizoguchi, K. Masuda, H. Ito, and S-R. Song, 2010, Effects of pressure on pre characteristics and permeability of porous rocks as estimated from seismic-wave velocities in cores from TCDP Hole-A, *Geophys. J. Int.*, 182-1148-1160.
- 喜多村 陽, 2010, 有限要素法を用いた開口型火道内圧力源による山体変形の研究, 東北大学修士論文.
- 児浪 愛・寅丸敦志, 間欠泉実験における噴出の前駆振動現象について, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SVC063-P25.
- Kuwano, O., 2010, Dynamic rupture propagation in agarose-gel, *The international conference on science of friction 2010 satellite meeting "Contact and stick-slip dynamics in sliding friction"*, Tokyo.
- Kwiatek, G., K. Plenkens, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS-Group, 2010, Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 1165-1173.
- Lin, W. and 33 others, 2010, Present-day principal horizontal stress orientations in the Kumano forearc basin of the southwest Japan subduction zone determined from IODP NanTroSEIZE drilling Site C0009, *Geophys. Res. Lett.*,

37, L13303, doi:10.1029/2010GL043158.

前田一樹・寅丸敦志, アナログ実験による間欠泉の噴出量の予測可能性, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 2-A11.

前田 一樹・寅丸 敦志, アナログ実験による間欠泉の噴出量予測可能性, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SVC063-P26.

Masuda, T., T. Miyake, and M. Enami, 2011, Ultra-high residual compressive stress ($>2\text{GPa}$) in a very small volume ($<1\mu\text{m}^3$) of indented quartz, *Am. Mineralogist*, in press.

三輪 学央・寅丸 敦志, 発泡マグマの底付けと衝撃波管: 桜島ブルカノ式噴火モデル, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, SVC063-12.

Mizoguchi, K. and E. Fukuyama, 2010, Laboratory measurements of rock friction at subseismic slip velocities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1363-1371.

溝口一生・福山英一・廣瀬丈洋, 2010, 高速すべり時の断層から放射される振動波の広帯域解析, 日本地球惑星科学連合 2010 年度連合大会予稿集, SSS020-P01.

Okumura, S., M. Nakamura, T. Nakano, K. Uesugi, and A. Tsuchiyama, 2010, Shear deformation experiments on vesicular rhyolite: Implications for brittle fracturing, degassing, and compaction of magmas in volcanic conduits, *J. Geophys. Res.*, 115, B06201, doi:10.1029/2009JB006904.

奥野喬也・川方裕則・土井一生, 2010, 破壊途上の岩石試料を用いた弾性波速度トモグラフィーによる断層検出の試み, 日本地震学会 2010 年秋季大会, P1-31.

Onuma, K., J. Muto, H. Nagahama, and K. Otsuki, 2011, Electric potential changes associated with nucleation of stick-slip of simulated gouges, *Tectonophysics*, in press.

Park, J.-O., G. Fujie, L. Wijerathne, T. Hori, S. Kodaira, Y. Fukao, G.F. Moore, N.L. Bangs, S. Kuramoto, and A. Taira, 2010, A low-velocity zone with weak reflectivity along the Nankai subduction zone, *Geology*, 38, 283-286.

Plenker, K., G. Kwiitek, M. Nakatani, G. Dresen, and the JAGUARS Group, 2010, Observation of seismic events with frequencies $f > 25\text{kHz}$ at Mponeng deep gold mine, South Africa, *Seism. Res. Lett.* 81, 467-479, doi:10.1785/gssrl.81.3.467.

Rubin, M.B. and M. Ichihara, 2010, Rheological models for large deformations of elastic-viscoplastic materials, *Int. J. Eng. Sci.*, 48, 1534-1543, doi:10.1016/j.ijengsci.2010.06.029.

Saisyu, H., A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2010, Precipitation of silica minerals in hydrothermal Flow-through experiments, *Water-Rock Interaction*, 13, 669-672.

Sakaguchi, A. and 11 others, 2010, Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface fault: Vitrinite reflectance geothermometry on IODP NanTroSEIZE cores, *Geology*, in press.

新海優里・渡辺了・道林克禎・針金由美子・小原泰彦, 2010, 深海底から採取した蛇紋岩の弾性波速度測定: 予察, 静岡大学地球科学研究報告, 37, 27-34.

寅丸敦志・前田一樹・市原美恵, 微動方程式を用いた間欠泉実験の前駆振動の解釈, 日本火山学会 2010 年秋季大会, 2-A12.

植田直彦・道林克禎, 2010, 1GPa, 800 °C におけるフリント中の石英多結晶体の結晶成長実験, 静岡大学地球科学研究報告, 37, 21-26.

Ujiie, K. and A. Tsutsumi, 2010, High-velocity frictional properties of clay-rich fault gouge in a megaseismic fault zone, Nankai subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2010GL046002.

Ujiie, K., M. Kameyama, and A. Yamaguchi, 2010, Geological record of thermal pressurization and earthquake instability of subduction thrusts, *Tectonophysics*, 485, 260-268, doi:10.1016/j.tecto.2010.01.002.

Watanabe, N., T. Ishibashi, Y. Ohsaki, Y. Tsuchiya, T. Tamagawa, N. Hirano, H. Okabe, and N. Tsuchiya, 2011,

Precise three-dimensional numerical modeling of fracture flow coupled with x-ray computed tomography for reservoir core sample, 2011, SPE J., in press.

山下太・福山英一・溝口一生・柳谷俊, 2010, 岩石の接触状態をモニターするための比抵抗測定システムの構築, 日本地震学会講演予稿集, P1-33.

安田 敦, 2010, 顕微 FT-IR 反射法による斑晶ガラス包有物の含水量定量, 火山, 印刷中.

吉開裕亮・寅丸敦志, マグマ溜りの脱ガスに関するアナログ実験, 日本火山学会 2010 年秋季大会, P-03.

Yoshimitsu, N. and H. Kawakata, 2011, Temporal changes in the Q of broadband P waves transmitting through a fracturing Westerly granite sample under triaxial compressive conditions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **101**, 421-426.

Yoshimura, S. and M. Nakamura, 2010, Fracture healing in a magma: An experimental approach and implications for volcanic seismicity and degassing, *J. Geophys. Res.*, 115, B09209, doi:10.1029/2009JB000834.

Yoshimura, S. and M. Nakamura, 2010, Chemically driven growth and resorption of bubbles in a multivolatile magmatic system, *Chem. Geol.*, 276, 18-28.

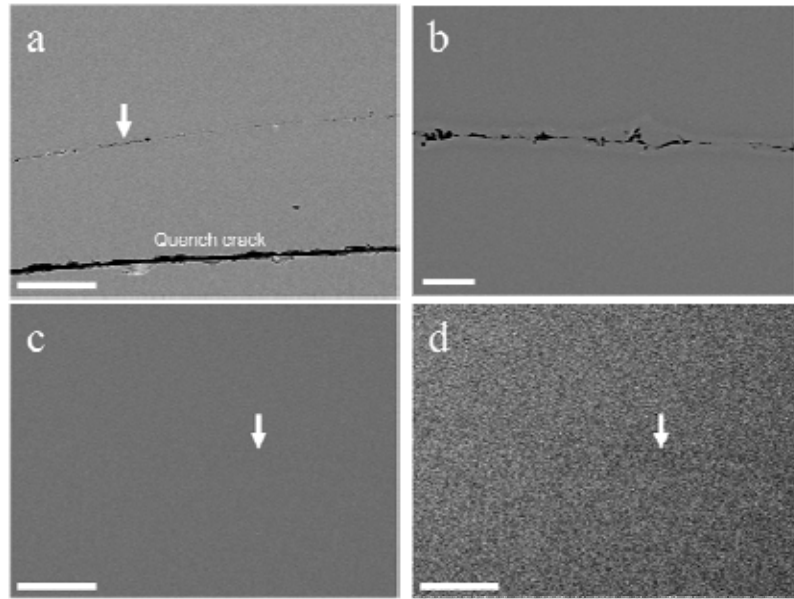


図 1. 900 におけるマグマ破断面の癒着実験の反射電子像（東北大学理学系研究科 [課題番号：1216] ）

(a) 未癒着の亀裂（矢印、圧着 4 時間後）。左下の割れ目は試料冷却時のもの。スケールバーは $100\ \mu\text{m}$ 。(b) (a) の拡大。亀裂付近は脱水により輝度が上がっている。スケールバーは $20\ \mu\text{m}$ 。(c) 亀裂部をまたいだ水の拡散プロファイルから、完全に癒着したことがわかる部分 (8 時間後)。界面は消失している。スケールバーは $100\ \mu\text{m}$ 。(d) (c) の高コントラスト像。癒着した亀裂部がわずかに視認可能。

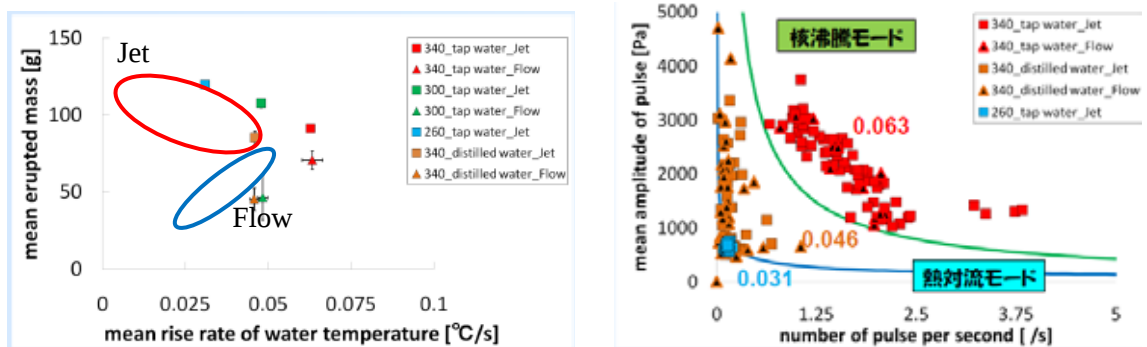


図 2. (左) 間欠泉実験における平均過熱速度と平均噴出量の関係（九州大学大学院理学研究院 [課題番号：2206] ）。爆発的噴出 Jet では負の相関があり、非爆発的噴出では正の相関がある。(右) 圧力パルスの発生率と振幅の関係。この二つの量の積は核沸騰による熱供給率の寄与の目安であり、平均過熱速度（グラフ内の数字）が大きいくほど核沸騰モードが卓越し噴出様式が混在するが、極端に小さい場合（青：熱対流モードが卓越）は Jet のみ起こる。