

多孔質石膏標的に対する斜め衝突破壊実験 Experimental study on the oblique collisional disruption on porous gypsum target

松榮 一真^{1*}; 高野 翔太¹; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ¹
MATSUE, Kazuma^{1*}; TAKANO, Shota¹; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kobe University, Japan

はじめに

小惑星の多くは、惑星形成過程において、熱進化しつつ成長する天体が、高速度衝突により破壊して形成したと考えられている。天体の衝突破壊は、小惑星を形成を始めとする太陽系天体の形成・進化過程を明らかにする上で重要な物理過程であり、この物理過程は、天体の内部構造に強く依存している。例えば、空隙率が高い物質の場合、衝撃波の減衰率は大きくなり、衝突破壊強度は大きくなる(Arakawa et al., 2002)。天体の空隙率は、衝突破壊を決める重要なパラメータであるが、一方、近年の小惑星探査によって内部に空隙が存在する多孔質小惑星が多く発見されている。多孔質小惑星への衝突現象を理解するために、Okamoto and Arakawa(2009)は、多孔質石膏球への高速度衝突実験を行った。しかし、彼らは正面衝突の実験のみであり、実際の天体衝突において支配的な斜め衝突の実験は行っていない。そこで本研究では、石膏球への高速度斜め衝突実験を行い、Okamoto and Arakawa(2009)と比較し衝突破壊現象における衝突角度依存性について調べた。なお、本研究は第7回惑星科学実験実習の実験テーマである。

実験方法

衝突実験は、神戸大学の横型二段式軽ガス銃で行った。弾丸は直径4.75mmのポリカーボネート球、標的は直径70mmの石膏球を用いた。石膏の空隙率は61%、引張強度は1.0MPa、バルク音速は1.19km/sである。衝突速度(v_i)は4.0km/s、7.0km/sの2種類で行い、衝突角度 θ は15-90°とした。衝突角度は正面衝突を90°と定義している。衝突の様子を高速ビデオカメラで撮影し、破片速度を計測した。フレームレートは1万-10万コマ/s、シャッタースピードは1/5万-1/50万sとした。また、実験後に標的物質を回収し破片質量を計測した。

実験結果

衝突によって標的に与えられるエネルギー密度 $Q(=m_p v_i^2 / 2M_t)$ と衝突最大破片の関係を見ると、 θ が90°の正面衝突の結果は先行研究(Okamoto and Arakawa 2009)の結果と一致した。衝突角度依存性についてみると、正面衝突から多少斜め衝突になっても(θ が小さくなる)、衝突最大破片は、正面衝突の場合と大きく変わることはなかった。一方、 v_i が4km/sで θ が15,30°、 v_i が7km/sで θ が15°の時は、衝突破壊ではなくてクレーターが確認され、衝突最大破片は大きく変化した。回収した衝突破片の累積個数分布も、最大破片の場合と同じで、正面衝突近傍では θ が変化しても有意な差は見られなかった。一方、 $\theta=15, 30^\circ$ ($v_i=4\text{km/s}$)、 $\theta=15^\circ$ ($v_i=7\text{km/s}$)では、破片分布は大きく異なることがわかった。

斜め衝突の場合、衝突破壊に有効な運動エネルギーは、衝突面に垂直な法線速度成分であると考えられる。そこでエネルギー密度に対して $Q_c(=m_p v_i^2 \sin^2 \theta / 2M_t)$ を用いると、Okamoto and Arakawa 2009の結果と正面衝突付近の結果では、ほぼ一致する。このことから、斜め衝突による衝突破壊では、正面衝突近傍では衝突速度の法線成分が重要であることがわかった。しかしながら、 $\theta=45^\circ$ ($v_i=4\text{km/s}$)、 $\theta=30^\circ$ ($v_i=7\text{km/s}$)では、衝突最大破片と Q_c の傾向が大きく変化した。また、 Q_c が小さくても最大破片はほとんど変化しなかった。これは斜め衝突時の衝突角度が小さくなると、法線速度成分だけでなく、接線速度成分に起因する剪断応力が衝突破壊に影響するためだと考えられる。

キーワード: 衝突破壊現象, 斜め衝突, 空隙率

Keywords: collisional disruption, oblique impact, porosity

粉体対流とその小惑星表面更新のタイムスケールへの応用 Granular convection and its application to asteroidal resurfacing timescale

山田 智哉^{1*}; 安藤 滉祐¹; 諸田 智克¹; 桂木 洋光¹
YAMADA, Tomoya^{1*}; KOUSUKE, Ando¹; MOROTA, Tomokatsu¹; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

近年、惑星探査機の調査により多くの小惑星表面は砂礫（レゴリス）や岩塊（ボルダー）に覆われていることが明らかにされてきた。特に小惑星イトカワでは、天体衝突起源の振動により表面レゴリスが流動化・分級したと考えられる地形が見つかった [1]。このレゴリスの流動化を説明する機構の一つとして粉体対流が注目されている [1]。また、粉体対流によるレゴリス粒子の移動・表面更新は、小惑星イトカワの比較的若い表面年代 1~8 Myr [2,3] を説明できるかもしれない。実際、地上の室内実験では、レゴリスのような粉体に鉛直振動を加えると粉体対流が発生することが知られている (e.g. [4])。しかし、イトカワをはじめとする小惑星のような微小重力環境下で生じる粉体対流の対流速度を見積もることを目指した定量的な粉体振動層の研究はまだ端緒にすぎたばかりである [5]。また、粉体対流による表面更新の可能性をそのタイムスケールにより議論した研究は皆無である。

この問題を解決するために、我々は室内実験を行い定常な鉛直振動を加えたガラスビーズ層の粉体対流速度を調べた。一般に室内実験で重力を変化させることは難しい。そこで、我々はスケーリング解析により粉体対流の対流速度と重力加速度の満たす関係を求めた。その結果、粉体対流の速度はほぼ重力加速度に比例することが分かった [7]。この実験結果より、粉体対流は微小重力環境下においても発生し得るが、その速度は極めて小さくなる可能性が示唆された。このため、対流による表面更新のタイムスケールは非常に長くなることが予想される。

本研究では、さらに粉体対流による表面更新過程をモデル化し、レゴリス層を持つ一般の小惑星の対流による表面更新のタイムスケールの推定を試みた。このモデルでは、対流による表面更新過程を

1. インパクターがターゲット小惑星へ衝突する衝突段階
2. 衝突による地震動が発生する振動段階
3. 振動によって対流が発生する対流段階

の三つに分けた。衝突段階ではメインベルト小惑星 (MBA) における天体衝突頻度モデル [7] を用いてインパクターの個数分布と衝突頻度を、振動段階では小惑星の衝突励起地震モデル [8] を用いて振動加速度と振動継続時間を、対流段階では実験で求められた粉体対流速度のスケーリング則 [6] を用いて対流速度をそれぞれ推定した。1~3 の各段階を統合し、小惑星上で起こるレゴリス対流による表面更新のタイムスケール T を小惑星直径 D^a の関数として求めた。

求めた T の表式に先行研究 [1, 7, 8] で標準として用いられている物性値 (衝突エネルギーから振動エネルギーへの変換効率: $\eta = 10^{14}$, 衝突励起地震の減衰の指標である Q 値: $Q=2000$ 等) を代入することで、小惑星の表面レゴリスが対流によって更新するために必要なタイムスケール T を求めた。結果、イトカワサイズの小惑星の場合 $T=9$ Myr となり、その表面のサンプルより示された表面年代 1~8 Myr [2,3] と同程度であることが分かった。更に、 $T=9$ Myr はイトカワの衝突寿命 (約 170 Myr [7]) より短い。すなわち、本研究により、イトカワのような小惑星表面においても対流による表面更新がその寿命内に十分に可能であることが明らかになったと言える。

- [1] H. Miyamoto et al., *Science* **316**, 1011 (2007).
- [2] K. Nagao et al., *Science* **333**, 1128-1131 (2011).
- [3] M. M. Meier et al., LPSC abstract #1247 (2014).
- [4] A. Garcimartin et al., *Physical Review E* **65**, 031303 (2002).
- [5] C. Gutteler et al., *Physical Review E* **86**, 050301 (2013)
- [6] T. M. Yamada and H. Katsuragi, *Planetary and Space Science* **100**, 79-86 (2014).
- [7] D. P. O' Brien and R. Greenberg, *Icarus* **178**, 179-212 (2005).
- [8] J. E. Richardson Jr. et al., *Icarus* **179**, 325-349 (2005)

キーワード: 粉体対流, レゴリス流動化, 小惑星, 表面更新
Keywords: granular convection, regolith fluidization, asteroid, resurface

障害物周りでの粉粒体の流れ場と出口における閉塞現象 Granular flow field around an obstacle and clogging at a bottleneck outlet

遠藤 圭太^{1*}; 桂木 洋光¹
ENDO, Keita^{1*}; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

流動状態にある粉粒体は、ボトルネックとなる出口でアーチ構造を形成して閉塞を起こすことがある。出口幅が粉粒体直径の約6倍以上になると閉塞現象が生じないことが経験的に知られているが、その流量は様々なパラメータに依存して変化する。例えば、流れの中に障害物があると閉塞の発生率が減少することがある [1]。そのため、障害物による粉粒体流の流れ場への影響を解明することで、粉粒体の閉塞現象の理解を深めることができると考えられる。また、このような現象の理解は、群衆の避難行動のような人々の流れをコントロールする建築物の構造設計などへも応用されることが期待される。この場合、避難する人々の流れを粉粒体の流れと見なせる。加えて、閉塞現象やアーチ構造形成のような粉粒体特有の非線形的な振る舞いは、地滑りや雪崩などの様々な地球物理現象にも関係すると考えられる。

本研究では、粉粒体の重力による出口流と障害物を用いた簡単な実験を行った。まず、2次元セル内に円盤状の障害物を挿入し、セルを直径 6.35 mm のステンレス球で満たす。そして、セルの下部中央に設けた小さな出口を開放し、出口へ向かう粉粒体流を作る。この粉粒体流の流れ場と流量、そして障害物にかかる抵抗力を高速度カメラとロードセルを用いて計測する。このようにして、出口の大きさと障害物距離をパラメータとした時、流れ場や流量がそれらのパラメータにどのように依存するかを実験的に調べる。

高速度カメラで撮影した粉粒体流の動画から、障害物を挿入することにより交互流が発生して空間的に非一様（非対称）な流れ場が生じる様子が観察された。一方で、出口からの流量がほぼ定常であることも明らかになった。この動画から流れ場をさらに粒子追跡法（PTV法）により解析した。PTV法を用いることで、個々の粒子の軌跡を追うことが可能となる。出口付近と障害物上部の左側、右側の3つの領域に分け、それぞれの領域における流れ場と粒子の充填率の時間変化を算出する。さらに、PTVデータから個々についての平均二乗変位（MSD）を計算する。

本発表では、これらの量と粉粒体流の流量や障害物にかかる抵抗力などの物理量との関係について議論する。さらに、出口幅や障害物距離などのパラメータの依存性から、障害物が粉粒体流の流れ場にどのように影響するかを解明していく。

[1] I. Zuriguel *et al.*, Physical Review Letters **107**, 278001 (2011)

キーワード: 粉粒体流, 閉塞, 障害物, 粒子追跡法, 平均二乗平均

Keywords: granular flow, clogging, obstacle, particle tracking velocimetry, mean square displacement

粒子画像分析法による粉碎粒子の粒子サイズおよび粒子形態特性評価に関する可能性検討 Feasibility Study of Morphological Characterization to Comminuted Particles by A Particle Characterization Approach

笹倉 大督^{1*}; 早内 愛子¹; 桑野 修²
SASAKURA, Daisuke^{1*}; HAYAUCHI, Aiko¹; KUWANO, Osamu²

¹ スペクトリス株式会社 マルバーン事業部, ² 独立行政法人海洋研究開発機構

¹Malvern instruments A division of Spectris Co., Ltd., ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. 諸言

断層破碎帯は断層ガウジと呼ばれる過去の断層破壊による粉碎、摩耗によって生成された粉体粒子でみだされている。断層ガウジの粒子径分布や形状は、断層の摩擦抵抗に影響するだろうし、過去の断層運動による破碎様式やその度合いを知る手がかりになるだろう。実際に断層破碎帯における粒径分布はべき分布となることが知られており、ベキの指数(フラクタル次元)は破碎のメカニズムや破碎の進行度を反映していると考えられている。また、粒子サイズ分布測定から過去の断層運動による破壊エネルギーを見積もる試みもなされている。今回、粉碎方法や粉碎の度合いと粒子サイズおよび形状の関係を調べるため、模擬粒子を用いていくつかの粉碎実験を行ったので報告する。今回、粉碎方法や粉碎の度合いと粒子サイズおよび形状の関係を調べるため、模擬粒子を用いていくつかの粉碎実験を行ったので報告する。

2. 実験

乾式粒子画像分析装置 Morphologi G3-SE(Malvern Instruments) を用いて粉碎粒子のサイズおよび形状を粒子径 $1 \mu\text{m}$ - $1000 \mu\text{m}$ の範囲で測定した。分散は乾式分散ユニット (SDU) により乾燥粉体の状態で実施された。 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子径も測定可能なレーザー回折粒度分布測定装置による粒子径分布測定結果と比較し、乾式粒子画像分析装置による粒子サイズ分布測定の有効性についても検討する。

キーワード: 断層ガウジ, 粒子径, 粒子形状, 粉碎, フラクタル次元

Keywords: Fault gouge, Particle size, Particls Shape, Comminution, Fractal Distributions

浮力駆動されるクラックの形・伝播様式・速度のパラメータ依存性 Shape, propagation style and velocity of a buoyancy-driven crack : a parameter study

竹口 いくみ^{1*}; 隅田 育郎¹
TAKEGUCHI, Izumi^{1*}; SUMITA, Ikuro¹

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科
¹ Kanazawa University

はじめに：マグマが上昇する過程で周囲の岩石のレオロジーは変化する。このためアセノスフェアでは粘性変形しマグマはダイアピルとして上昇する一方、リソスフェアでは弾性破壊しダイク貫入により上昇する (Rubin,1995)。それでは粘性変形と弾性破壊の遷移領域ではマグマはどのように上昇するのだろうか。私達は寒天の硬さを幅広く変えたモデル実験によりこの遷移領域における浮力駆動されるクラックの研究を進めている (Sumita and Ota, 2011)。本発表ではクラックの形、伝播様式、速度に着目して主としてマグマの粘性率が粘弾性体中のマグマ輸送に与える影響について調べた実験結果について報告する。

実験方法：(1) 使用する寒天のレオロジー測定、(2) 注入実験、の2つを行う。注入実験は直径 160mm、長さ 250、500mm のアクリル円柱内の寒天 (母岩) に CsCl 水溶液に増粘剤を加えたもの (マグマ) を上部からシリンジを用いて注入して行う。その際、注入する体積を 1ml、注入速度を 1ml/s に固定し、寒天との密度差は 0.580 と 0.770g/ml の2通りで行った。実験パラメータとして寒天の濃度を 0.06~0.5wt%、注入流体の粘性率を 10^{-3} ~1300Pa・s と 6 桁変化させた。寒天の濃度は 1 桁変えることで降伏応力が 3 桁、剛性率が 2 桁変化する。クリープ試験により濃度の高い寒天 (> 0.1wt%) はバネとフォークトモデルを直列につないだ粘弾性モデル、低い寒天 (< 0.1wt%) はバーガーズモデルで近似できる。実験は直交する 2 方向と容器下方からビデオカメラで撮影し、観察する。以下、粘性率とは注入流体のものを指す。

結果：クラックの形・伝播様式・速度に着目して以下の3つのレジームに分けた。I：形が 2D (板状) であり、直進し、停止距離が短い。クラックの伝播距離 (z) を時間の冪乗則の形 ($z \propto t^n$) で求めた冪の値 (n) は $n \sim 1/5$ であり、速度が粘性率 (η) に対して $1/\eta$ に比例する傾向を持つ。II：形が 2D と 3D (頭が膨れたもの) の遷移状であり、伝播中に曲がるか、蛇行し、伝播則の冪は $1/3 < n < 1$ である。蛇行するものは粘性率を上げると、蛇行の振幅が小さくなり直線的となる。これは Sumita and Ota (2011) で報告された注入流体の密度を小さくした場合と同じ傾向である。速度は I と III との間である。III：クラックの形は 3D であり、直進し、停止距離は長い。伝播則の冪は $n \sim 1$ であり、速度は粘性率にあまり依存しない。

考察：I と II、II と III のレジーム境界は、大局的には無次元の浮力 $B = -(\Delta \rho g V^{1/3})/G$ ($\Delta \rho$: 密度差、 g : 重力加速度、 V : クラック頭の体積) で決まる。レジーム I - II は $B \sim 1$ 程度で遷移する。ただしより詳しくは流体の粘性率が大きくなると、臨界 B 値が大きくなる傾向がある。これは粘性率が大きくなるとクラックの伝播速度が遅くなり、クラックの尾に流体が残りがやすく、クラック頭の体積が小さくなり、実効的な B 値が小さくなるためと理解できる。クラックの伝播速度は I のレジームではチャンネルフロー速度 ($n=1/3$: Taisne et al. (2011)) と同程度かそれ以下、III のレジームではストークス沈降速度 ($n=1$) 及び横波速度と同程度であり、II のレジームではその中間であった。従って一定体積、密度下では、粘性率が高い程、レジーム I から III に移行するに従い、速度が大きく増大する。また以上の結果は流体の速度、母岩の変形速度ばかりでなく、破壊伝播速度 (~ 横波速度) が律速していることを示している。実際、既存のクラックがある場合、伝播速度は既存のクラックがない場合に比べて速くなることを確認した。レジーム II を特徴付ける伝播経路の蛇行は粘性率が高くなると消滅した。これは蛇行が起きるためには $B \sim 1$ に加えて、臨界速度 (あるいは臨界レイノルズ数) が存在することを示唆している。

引用文献：

- Rubin, A. M., 1995, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 23, 287-336.
- Sumita, I. and Y. Ota, 2011. Earth Planet. Sci. Lett., 304, 337-346.
- Taisne, B. et al., 2011, Bull. Volcanol., 73, 191-204.

キーワード: マグマ上昇, クラック伝播, 粘弾性, 流体粘性率, 浮力
Keywords: magma ascent, crack propagation, viscoelasticity, fluid viscosity, buoyancy

三軸圧縮破壊試験における庵治花崗岩の弾性波速度測定 Measurements of elastic wave velocity of Aji granite on triaxial compression fracture test

財間 寛太^{1*}; 片山 郁夫¹
ZAIMA, Kanta^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima university

弾性波速度は地下構造を把握するための重要な物性のひとつである。特に地熱発電では、地熱流体がトラップされた地熱貯留層の評価において重要な役割を担っている。さらに水圧破碎によって形成される人工的な地熱貯留層の評価においても欠かせない物性である。弾性波速度は空隙率、クラックの形状や分布、流体の有無などその状況によって変化する。これまでは封圧に対する速度変化 (Nur and Simmons, 1969) や岩石の破壊過程での速度変化 (Bonner, 1974) など様々な実験結果がえられている。実験室でこれらの変化を調べることは地下構造のデータの解釈、つまり地熱貯留層・人工貯留層の評価につながる。本研究では間隙水圧をかけた状態での破壊過程の速度変化を調べ、水圧破碎においての人工貯留層評価につなげることを目的として、卒業研究では広島大学の容器内変形透水試験機による弾性波速度測定システムを改良し、乾燥状態での破壊過程の弾性波速度変化を調べた。

試料には庵治花崗岩を円柱形に成形したものをを用いて、試料の上側に圧電素子を配置するパルス反射法、試料の上下に圧電素子を配置する透過法 (σ_1 方向)、試料の側面に直接圧電素子をはりつける透過法 (σ_3 方向) の3つを試した。これら3つの方法でそれぞれ封圧 10-200MPa で弾性波速度を測定したところ、それぞれの測定法で封圧の上昇に伴う圧密効果による弾性波速度の増加を確認することができた。しかし、パルス反射法、透過法 (σ_1 方向) においては波の減衰が大きく、空隙の多い低圧下や試料の長さが長くなると速度を算出できず、破壊実験で用いる長さ 40mm の試料ではこれらの測定方法を用いることができない。これに対して透過法 (σ_3 方向) では、圧電素子を試料に直接貼り付けるために圧電素子を再利用できないが、他の2つの測定方法と比べて波の減衰を最小限に抑えることが可能である。

以上の結果から透過法 (σ_3 方向) を用いて破壊中の庵治花崗岩の弾性波速度の測定を行った。この破壊実験は容器内変形透水試験機のサーボによる載荷システムを用いて、封圧 20MPa、変位速度 0.01mm/min で一定に保ち行った。間隙水圧は 0MPa である。サンプルには庵治花崗岩を長さ 40mm、直径 20mm、また側面に圧電素子ををはる加工を行ったものを用いた。破壊応力のおよそ 1/5 までは弾性波速度の増加がみられ、そこから徐々に速度変化がなくなり破壊応力のおよそ 1/3 を超えるあたりから速度が減少に転じる。これはまず、既存のマイクロクラックの閉鎖によって速度が増加し、その後徐々にサンプル内に新たなクラックが生成することで速度変化が減少に転じ、このクラックの生成の効果がより強くなることで速度が急激に減少すると考えられる。つまり、この速度の減少はダイラタンシーの効果で説明することが可能である。また、本実験においては S 波の振動方向を最大圧縮軸に対して垂直にしているため、 V_s の増加は σ_3 方向に伸びているクラックの閉鎖に強く影響を受けていると考えられる。

キーワード: 弾性波速度, 地熱貯留層, 水圧破碎, ダイラタンシー

Keywords: elastic wave velocity, geothermal fluid reservoir, hydraulic fracturing, dilatancy

かんらん石-輝石多結晶体における鉱物混合層の形成と歪み弱化 Rheological weakening due to phase mixing of olivine + orthopyroxene

田阪 美樹^{1*}; Zimmerman Mark¹; Kohlstedt David¹
TASAKA, Miki^{1*}; ZIMMERMAN, Mark¹; KOHLSTEDT, David¹

¹ ミネソタ大学

¹University of Minnesota

The formation of well-mixed, fine-grained, poly-phase rocks may lead to strain localization and play a key role in the development of the lithosphere asthenosphere boundary (LAB). To understand the mixing process in the olivine + orthopyroxene rocks, we have conducted torsion experiments on samples of iron-rich olivine + orthopyroxene aggregates at a temperature of 1200 °C and a pressure of 300MPa. We fabricated the samples with grain sizes significantly larger than the steady state grain size. The samples were deformed to total shear strains up to $\gamma = 17$. We conducted two series of torsion experiments, the first at fixed strain rate to different strains and the second at different strain rates to the same strain.

The stress exponent of $n \approx 3$ and grain size exponent of $p \approx 1$ were determined from a least-squares fit to the strain rate, stress and grain size data using a power-law creep equation; these values of n and p indicate that our samples deformed by dislocation-accommodated grain boundary sliding. Dynamic recrystallization occurred with significant grain size reduction of both phases in deformed samples. Well-mixed microstructures develop in samples deformed to higher strains at faster strain rates, whereas elongated olivine and pyroxene grains without a mixed texture are observed at lower strain and strain rate. Mixing of the olivine and orthopyroxene phases occurs due to a contribution of interface-reaction-limited diffusion (IRLD) creep [Sundberg and Cooper, 2008]. This IRDL creep process involves diffusion of metal oxides along phase boundaries oriented perpendicular to σ_1 to boundaries parallel to σ_1 resulting in the formation of new pyroxene grains along boundaries perpendicular to σ_1 and olivine grains along boundaries parallel to σ_1 . Grain size reduction due to dynamic recrystallization of olivine and orthopyroxene enhance the rate of this process.

Keywords: olivine, opx, deformation, mixing process

高圧条件下におけるアコースティックエミッション測定の新技術開発 Technical developments on acoustic emissions monitoring at high pressures

大内 智博^{1*}; 雷 興林²; 肥後 祐司³; 丹下 慶範³; 入船 徹男¹
OHUCHI, Tomohiro^{1*}; LEI, Xinglin²; HIGO, Yuji³; TANGE, Yoshinori³; IRIFUNE, Tetsuo¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター, ² 産業技術総合研究所, ³ 高輝度光科学研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ³Japan Synchrotron Radiation Institute

The subduction zone produces a major fraction of the Earth's seismic activity. Intermediate-depth earthquakes within the subducting slab form a double seismic zone. The cause of intraslab seismicity have been attributed to dehydration of hydrous minerals (e.g., Peacock, 2001). Brittle fracture associating dilatancy is difficult at high pressures (i.e., depths at which intermediate-depth and deep-focus earthquakes occur), although dilatancy prior to failure usually occurs in the case of shallow-depth earthquakes.

At deeper depths, dehydration embrittlement (i.e., hydrofracturing) is expected to play an important role in failure of rocks because the overall volume change of the dehydration reaction is positive and thus pore pressure can be increased (e.g., Raleigh and Paterson, 1965). However, experimental results on dehydration embrittlement of antigorite are controversial. Dobson et al. (2002) conducted a series of experiments on dehydration of antigorite, and they reported that dehydration of antigorite associates acoustic emission (AE) when the dehydration reaction is positive. Even though the volume change becomes strongly negative above 2 GPa, Jung et al. (2004) reported that brittle failure of antigorite occurs at pressures up to 6 GPa. Recently, Gasc et al. (2011) reported that no detectable AEs through dehydration of antigorite-rich serpentinite. Therefore, the cause of intermediate-depth earthquakes is still unclear.

In some of subduction zones, a significant activity of deep-focus earthquakes has been reported (e.g., Kirby et al., 1996). It has been proposed that deep-focus earthquakes are triggered by an instability faulting caused by olivine phase transformations (Kirby et al., 1991; Green et al., 1992). Schubnel et al. (2013) conducted deformation experiments on germanium olivine (Mg₂GeO₄) at 2-5 GPa and 1000-1250 K, and they observed many AEs generated in the sample. Schubnel et al. (2013) discussed that fractures nucleated at the onset of the olivine-to-spinel transition.

To investigate the brittle properties of rocks, determination of AE source is critical. In the community of high-pressure rock physics, Green et al. (1992) conducted AE monitoring by using a Griggs apparatus combined with an AE sensor. Dobson et al. (2002, 2004) and Jung et al. (2006) adopted 2 or 4 AE sensors to a multianvil apparatus. However, the position of AE source has not been determined in the experiments because of not enough number of sensors used in the experiments. De Ronde et al. (2007) adopted 8 AE sensors to a multianvil apparatus and they succeeded to determine the position of AE sources. Recently, Gasc et al. (2011) succeeded to develop an experimental setup that allows determining the position of AE source by using DIA-type multianvil apparatus combined with 6 AE sensors. Schubnel et al. (2013) adopted the experimental setup reported by Gasc et al. (2011) to a D-DIA apparatus installed at a synchrotron facility, and they succeeded to measure strain and stress of the sample and AE signals. We have developed an experimental setup that is optimized for the determination of the position of AE source in a synchrotron D-DIA apparatus. We will report some preliminary experimental results on AE monitoring under the upper mantle conditions.

Keywords: acoustic emission, high pressure, earthquake

中性子と AE 信号同時測定による岩石の変形メカニズムの研究 Study of rock deformation mechanism using neutron diffraction technique and AE signal measurement

阿部 淳^{1*}; 関根 孝太郎²; ハルヨ ステファヌス³; ゴン ウー³; 相澤 一也³
ABE, Jun^{1*}; SEKINE, Kotaro²; HARJO, Stefanus³; GONG, Wu³; AIZAWA, Kazuya³

¹ 一般財団法人 総合科学研究機構, ² 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ³ 独立行政法人 日本原子力研究開発機構

¹CROSS-Tokai, ²JOGMEC, ³JAEA

Acoustic emission (AE) is defined as a transient elastic wave generated by the rapid release of energy within a material. Crack initiation and slipping generated inside rock materials are all detectable with the measurement of AE signals, and therefore such measurement helps to research the underlying mechanism of macroscopic deformation. On the other hand, strain gauge is commonly used to measure strain in rock. In recent years, diffraction techniques for investigating strain in engineering materials have been developed. Strain measurements using diffraction technique are based on Bragg's law. Strain value can be estimated from the changes of lattice parameter.

Accumulation of macro strain in rock samples is generally caused by lattice strain as well as grain boundary shearing and pore collapse generated inside the rock, which would be detectable as AE events. Therefore, simultaneous using of neutron diffraction technique and AE signal measurements should provide us with new insight into rock deformation and fracturing mechanism. In order to study deformation mechanism of geological materials under uni-axial compression, neutron diffraction patterns and AE signal have been measured simultaneously.

Berea sandstone and calcarenite are used as a specimen. Main composed mineral of Berea sandstone is quartz (SiO₂), and that of calcarenite is calcite (CaCO₃) with minor apatite. Berea sandstone was compressed uniaxially up to 35.6 MPa with two-cycle compression. Calcite was compressed until the specimen fractured at 16.4 MPa. Lattice strain measurements using neutron diffraction technique were performed at the Engineering Materials Diffractometer "TAKUMI" in J-PARC/MLF. The diffractometer have been designed to investigate the stress-strain state of engineering materials (e.g. steel) using a pulsed neutron beam. Macroscopic strain was recorded using a strain gauge attached to the rock specimen surface. AE signal measurements were conducted using USB AE NODE (PHYSICAL ACOUSTIC CORP.) with a miniature AE sensor (Micro30) attached to a compression jig.

Macroscopic strain of both rock materials was greater than lattice strain. Inside rock specimens, mineral grain slip and pore collapse might be generated under compression. These changes would induce macroscopic deformation of the rock specimens. In addition, AE signals which might be derived from these changes in the internal structure of the rock specimens were detected. Parameters of AE signals might be a function of the amount of grain-boundary shear and/or the degree of resistance to deformation. And the frequency characteristics of AE signals depend on rock type. This difference between rock types might be related to the deformation mechanism of the rock specimens.

キーワード: 中性子回折, 格子ひずみ, AE 信号, 一軸圧縮, 岩石の変形

Keywords: neutron diffraction, lattice strain, AE, uni-axial compression, rock deformation

熱水条件下におけるかんらん岩の高圧変形実験：リソスフェアの強度弱化における含水反応の効果 High-pressure deformation experiments on olivine-orthopyroxene aggregates under hydrothermal conditions

福島久美^{1*}; 平内健一¹; 木戸正紀²; 武藤潤²
FUKUSHIMA, Kumi^{1*}; HIRAUCHI, Ken-ichi¹; KIDO, Masanori²; MUTO, Jun²

¹ 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻, ² 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Geosciences, Graduate School of Science, Shizuoka University, ²Department of Earth Sciences, Tohoku University

沈み込みはトランスフォーム断層などの既存の弱面を元にして発生すると考えられているが、この弱面の強度は数値モデルによると摩擦係数が0.05以下であることを必要とする。これは深度30 kmにおける断層強度が50 MPa以下であることを意味する。しかしながら、かんらん石の摩擦強度、転位クリープから推定される強度は約700 MPaとなり、しきい値を大きく逸脱する。これまでに、断層強度を低下させるメカニズムとして、流体やメルト、拡散クリープ、蛇紋岩化などが候補に挙げられてきた。蛇紋岩化はかんらん岩が水と反応することによって生じ、トランスフォーム断層などの海洋マントルまで海水が入り込むことが可能な領域で起こる。これまでの変形実験では、蛇紋石がかんらん石と比較して様々な温度圧力条件において強度が低いことを明らかにしている。しかしながら、高温高圧下におけるかんらん岩の含水反応のカイネティクスやかんらん岩の強度が含水反応の進行に伴ってどのように変化するのかについては、ほとんど明らかになっていない。

そこで本研究では、Griggs型固体圧式変形装置を用いて熱水条件下でかんらん岩ガウジの単純剪断変形実験を行った。出発物質はサン・カルロス産かんらん石とタンザニア産斜方輝石の粉末試料を用いて、ハルツバージャイトを想定した7:3の割合で混合した。実験条件は温度500 °C、封圧1.0 GPaで、一定の剪断歪速度(剪断歪速度 $5.9 \times 10^{-5} \sim 4.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)で行った。その結果、全ての剪断歪速度条件下において応力-歪曲線は同様の挙動を示した。まず、弾性変形が起こり最大剪断応力(350~400 MPa)に達した後、10~120分間かけて応力が60~150 MPa降下した。その後定常状態の変形がしばらく続くが、1回目と比較してゆっくりとした応力降下が再び起こり定常状態に至った。さらに最終的な強度は剪断歪速度の低下に伴い減少し、最も遅い剪断歪速度($4.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)における最小強度は30 MPaとなった。実験後の試料には剪断歪量の増加に伴いR₁面、B面、Y面などの複合面構造が発達していた。また、変形後の試料では出発物質粒子が粒子間結合していた。剪断面近傍では出発物質の粒径減少が認められ、粒界を埋めるように滑石が生成していた。さらに、剪断面にも滑石は生成し、生成量は変形時間あるいは剪断歪量の増加に伴い増加した。

実験初期においてガウジ試料は溶解-沈殿プロセスにより粒子間結合が生じるため強度が増加し、その後、強度が臨界点を超えると局所すべりが発生すると考えられる。1回目の急激な応力降下の間、剪断歪速度は増加していることから、不安定すべりが起こっていたと考えられる。また、2回目の緩やかな応力降下は剪断面に沿った滑石の生成および増加に起因すると考えられる。本実験において蛇紋石ではなく滑石が生成した理由として、400 °C以上の高温下において斜方輝石がかんらん石と比較して優先的に溶解し、「斜方輝石 → かんらん石 + SiO₂」および「斜方輝石 + SiO₂ + H₂O → 滑石」という反応が連続して起こったことに起因すると考えられる。本実験における最小強度(30 MPa)は深度30 kmを想定したかんらん石、蛇紋石の摩擦強度と比較して低く、摩擦係数が0.05以下である沈み込み可能強度である50 MPaの範囲に収まる。天然におけるハルツバージャイトにおいても、滑石が生成する反応は斜方輝石を完全に消費するまで起こり、その後は蛇紋石が形成されると考えられる。このことから本研究における反応プロセスは含水反応初期にみられるプロセスであると考えられる。したがって、高温高圧下における断層強度の初期の弱化プロセスにおいて、かんらん岩の熱水反応による滑石生成の影響が示唆される。

キーワード: かんらん石, 斜方輝石, 滑石, 含水反応, 強度弱化, 沈み込み開始

Keywords: olivine, orthopyroxene, talc, hydration reaction, strength weakening, subduction initiation