

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02002

研究課題名(和文)超高速放射光X線イメージングを用いた岩石の亀裂伝播と断層ダメージのその場観察

研究課題名(英文)in situ observation of fracture propagation of rocks and fault damage by synchrotron ultra fast X ray imaging

研究代表者

長濱 裕幸 (Nagahama, Hiroyuki)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：60237550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：地震の破壊伝播時に形成される粉碎岩石の形成機構を明らかにするため、Split Hopkinson圧力棒法による衝突実験機を制作した。花崗岩、アーカンソー州ノバキュライト、マコールを対象に、衝突棒の衝突速度を制御することで、1000/sを超える非常に大きなひずみ速度を発生させた。実験の結果、各岩石における破壊および亀裂伝播の様式が異なること、また粉碎試料の粒度分布が天然の断層帯で報告されているフラクタル的なサイズ分布を持つことを明らかにした。この研究は地震時の岩石粉碎によるエネルギー散逸の定量的な評価法を提示し、今後の断層の動的粉碎研究に大きな影響を与える可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地震時に断層周辺で発生する高いひずみ速度を再現できる衝突実験から、天然断層の粉碎度に近い高いフラクタル次元が得られた。また、実験による力学計測から動的粉碎時の破壊エネルギーの評価が可能であり、両者を結びつけることで断層周辺での岩石粉碎によるエネルギー散逸を定量的に把握することが可能となる。本研究により、破壊エネルギーの上限値を実験的に明らかにすることができれば、断層破壊の停止をエネルギーの観点から評価することのできる現実に近い地震破壊シミュレーション構築に貢献するだろう。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the mechanism of rock pulverization formed during earthquake rupture propagation, we constructed an impact experimental rig using the Split Hopkinson Pressure Bar method. We controlled the collision speed of the impact bar on samples of granite, novaculite from Arkansas, and Macore (machinable ceramics often used in previous studies), generating a very high strain rate exceeding 1000/s. As a result of the experiments, we clarified that the pattern of fracturing and crack propagation varies among each rock type, and that the grain size distribution of the pulverized samples exhibits a fractal size distribution similar to that has been reported from natural fault zones. This research presents a quantitative evaluation method for energy dissipation due to rock pulverization during earthquakes, and may have a significant impact on future studies of dynamic fault pulverization.

研究分野：固体地球科学

キーワード：粉碎岩 断層破砕帯 フラクタル 衝突実験 断層破壊電波

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の生活を脅かす地震とは、地下で亀裂が秒速 2-3km(岩石の横波速度に相当)の高速で成長する破壊現象である。これまでの亀裂伝播を扱う動的破壊モデルでは、断層の主すべり面のみでの岩石の破壊を考慮し、破壊が止まるには、その先端にありえないほど固く壊れにくいバリアの存在が必要になっていた。しかし、その岩石物理的意味は明らかでなく、未だ、「地震がどのように止まるのか」、は物理的に説明できない。

天然の断層破碎帯の観察から、米国サン・アンドレアス断層や有馬-高槻断層などの横ずれ断層近傍において、著しく破碎された断層粉碎岩(pulverized fault rock)が報告された[1]。破壊とは、蓄えたひずみエネルギーを破壊により生じる表面エネルギーへと転化する現象である(Griffithエネルギー平衡理論)ことから、粉碎岩の存在は断層破碎帯での著しいエネルギー散逸の可能性を示唆する[2]。

これまで我々は、Griffith エネルギー平衡理論に基づき、岩石破壊時の粒子のフラクタル特性(自己相似性)を考慮することで、エネルギー散逸(破壊エネルギー・粒子サイズ)則を理論的に提案してきた[3]。さらに、サンアンドレアス断層や有馬高槻断層沿いに分布する粉碎岩のフラクタル次元 D (粒子の粉碎度を示す数値) は、断層近傍で最も高く、剪断破壊による理論値 ($D \sim 2.6$) を超える粒子が存在することを報告している(図1, [4])。これらの大規模横ずれ断層沿いで見られた3に近い D 値は隕石孔などから報告されていることから、粉碎岩は地震の高速すべりによる剪断破壊ではなく、衝撃破壊に近い爆発的な変形機構で形成されたことを示唆する。しかし断層破壊時に断層破碎帯(off-fault)でおこる高ひずみ速度変形を再現できる岩石変形試験機は多くなく、高ひずみ速度と岩石ダメージとの定量的関係は未だ不明である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地震時の断層近傍で発生する高ひずみ速度での岩石の動的粉碎現象を再現することの出来る唯一の実験機である衝突変形実験機を製作し、1000/s を超える高ひずみ速度下での岩石粉碎現象を明らかにすることである。そのために、本研究により国内の固体地球系研究機関で初めて、Split Hopkinson 圧力棒法衝突試験機(SHPB)を作成し、予備実験による精度・特性評価および地殻岩石の動的粉碎実験から、岩石粉碎時のエネルギー散逸を記述する破壊エネルギー・粒子サイズ則を構築することである。

3. 研究の方法

本研究では、地震時の $10^3/s$ を超える高ひずみ速度変形が可能な Split Hopkinson 圧力棒法衝突試験機(SHPB)を作成し、高ひずみ速度での粉碎機構解明とエネルギー損失過程の解明を目的としている。まず、作成した実験機本体の性能評価を目的とした予備実験を行い、衝突実験における重要な動的応力平衡条件に関して確認を行う。その後、地殻岩石試料として代表的な花崗岩に加えて、過去の論文で使用されているノバキュライトとマコールを使用した。全ての試料は円

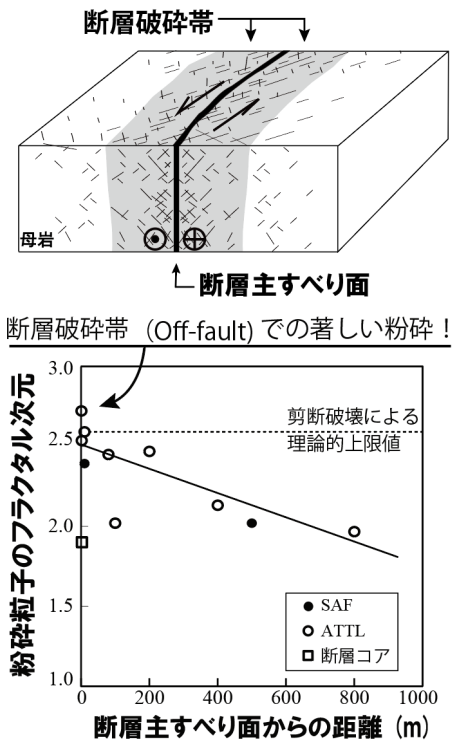


図1 断層破碎帯のフラクタル次元分布 (Muto et al., 2015 を改変)。

柱型で、直径、高さ共に約 9.5~10 mm に成形した。本研究では試料のダメージ評価として、以下の 3 つの方法を用いて、動的粉砕を評価した：1. SHPB に設置したひずみゲージを使用した試料の力学特性計測、2. 高速カメラを用いた亀裂の観察、3. 回収試料を対象にした篩による粉砕粒子のフラクタル次元測定を行った。

4. 研究成果

(1) SHPB 試験機の基本性能評価

本試験機の基本性能を調べるため、庵治花崗岩を用いた予備実験を行った。衝撃試験の結果、衝撃速度とコンプレッサーの圧力に明確な相関があることが明らかになった(図 2)。コンプレッサー内の圧力は、コンプレッサー内の機械式ニードル弁を使用して、最小で 0.02 MPa まで調整することが可能である。これまで本装置でテストした衝突棒の最大衝撃速度は、1 MPa の圧力下で 23.4 m/s であった。岩石に生じるひずみ速度は衝突速度で詳細に制御できることから、本実験機で高ひずみ速度下で起こる岩石のダメージを定量的に評価することができる。

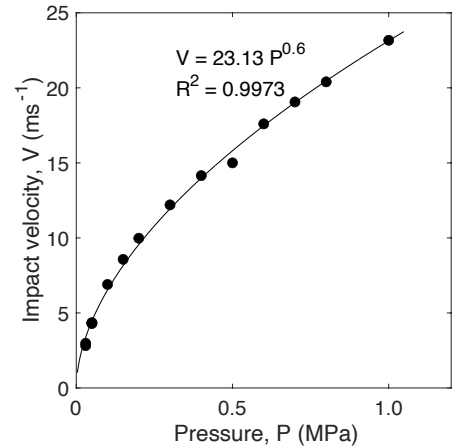


図 2 衝突時のガス圧と衝突速度

(2) 応力平衡の検討

これまでの衝突実験から、岩石などの脆性材料の高ひずみ速度での変形では、試料が動的応力平衡にあるかどうか非常に重要であることが知られている。試料を挟んだ両側での応力を σ_1 、 σ_2 とすると、動的応力平衡は、 $\sigma_1 = \sigma_2$ であり、入射波 (I)、透過波 (T)、反射波 (R) のひずみ ε から $\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$ という条件で表される。過去の研究[5]によると、適切な寸法のパルスシェイパーを用いる

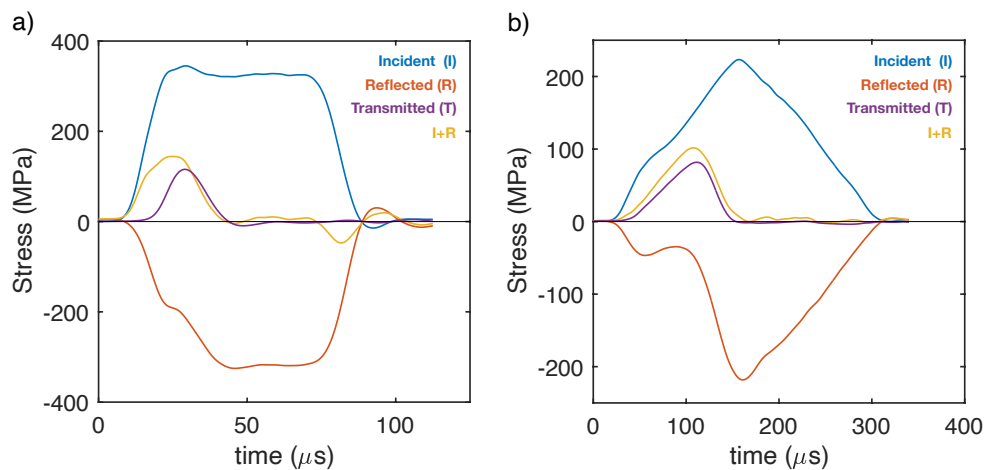


図 3 ひずみゲージデータを用いた動的応力平衡性の検討。a) 応力平衡が達成されていない条件、b) 応力平衡が達成された実験。

ことで、衝撃波の急激な立ち上がりをなめらかにし、応力平衡が満たされることから、庵治花崗岩を用いた予察的な実験を行った。図 3 は、7.6 mm (直径) × 1.6 mm (厚さ) に整形した無酸素銅製のパルスシェイパーを使用した実験での入射波 (I)、透過波 (T)、反射波 (R) および $I + R$ 波の 4 つのひずみ信号を示している。パルスシェイパーを使用しない実験では、 $T = I + R$ の条件で応力平衡が達成されなかったが(図 3a)、パルスシェイパーを利用した実験では、ほぼ同じ $T \sim I + R$ のひずみ信号が観察された(図 3b)。以上から、脆性材料である岩石においても、パルスシェイパーの利用によって応力ひずみ曲線と力学エネルギーを評価できることが明らかになった。

(3) エネルギー評価

動的粉砕時の破壊エネルギーと粉砕の定量的関係を明らかにすることを目的として、様々な岩石を用いた動的粉砕実験を行った。試料には、過去の研究でも使用されている花崗岩（稲田）、ノバキュライト、マコール（切削性セラミック）の3種を用いた。ひずみゲージを使用した計測から、これらの試料に加わった応力、ひずみ、ひずみ速度を測定した。さらに、応力ひずみ曲線を積分することで試料に加わったエネルギーを算出した。ひずみゲージデータの詳細な解析から、応力平衡を達成している試料は全8試料のうち4つのみということが分かった。応力平衡を達成している試料では、正確に力学特性を測定することができ、解析の結果、1000/sに達するひずみ速度が得られた。また、これらの試料においては、衝突ガス圧が高くなればなるほど、試料のひずみ速度が速くなり、動的強度も高くなることが明らかになった。高速カメラ（Photron社FASTCAM Mini AX100）を使用した60000フレーム毎秒（FPS、フレーム感覚17xms）での撮影。亀裂の観察により、亀裂の伸展方位は試料のモード組成や粒形の違いによって変化する可能性を示した。図4、5は、それぞれ稲田花崗岩、ノバキュライトの動的粉砕の様子を示す。

今回実験を行った衝突圧力 (>0.1 MPa) の全ての回収試料において試料の粉砕化が見られ、衝突圧の増加に伴い粉砕度も高くなっていった。そこで、回収試料の篩分けにより、粒度分布計測を行った。計測した試料において粒子のサイズ分布にフラクタル特性が見られた（図6）。しかし、フラクタル特性は測定した全領域において決して一意のフラクタル次元ではなく、その分布には明確な折曲りが存在し、細粒（半径0.1~0.3 mm）な粒子に比べて、粗粒（半径0.3 mm以上）な粒子はフラクタル次元が大きいという傾向が見られた（図6）。また一部の粗粒な粒子（半径0.3 mm以上）のフラクタル次元は、これまで我々が天然断層から報告した断層で見られる粉砕破壊を再現している可能性を示唆する。今後は、粉砕物の詳細な粒径測定と実験的に得られた力学特性から、断層形成時の破壊エネルギーの最大値を明らかにすることで、断層破壊の停止をエネルギー

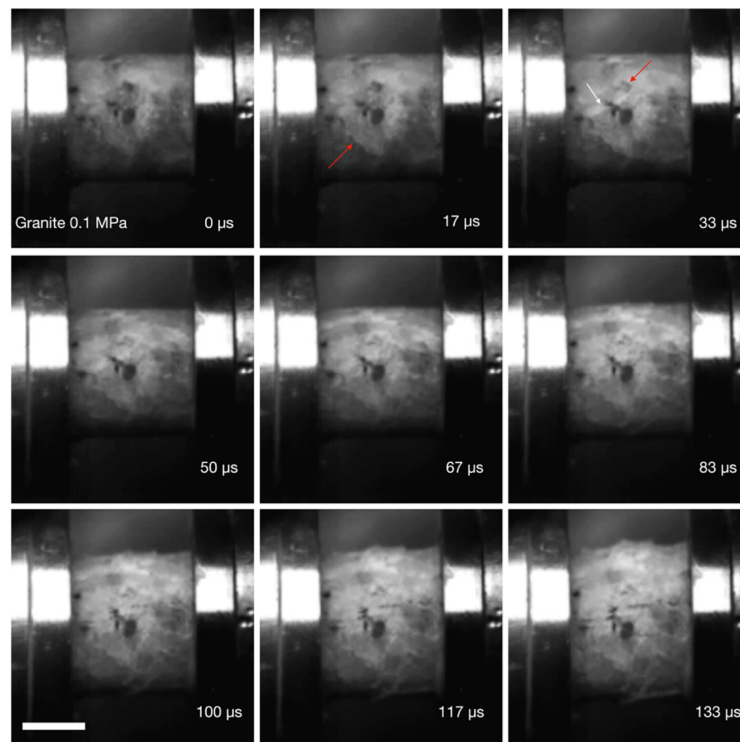


図4 高速カメラで捉えた花崗岩試料の動的粉砕挙動。衝突圧 0.1 MPa での実験、右下の時間は撮像時間を表す（60000FPSでの撮影）。赤・白矢印は、それぞれ初期亀裂とその後に発達した亀裂を示す。スケールは0.5 mm.

ギーの観点から評価することのできる現実に近い地震破壊シミュレーション構築に貢献したい。

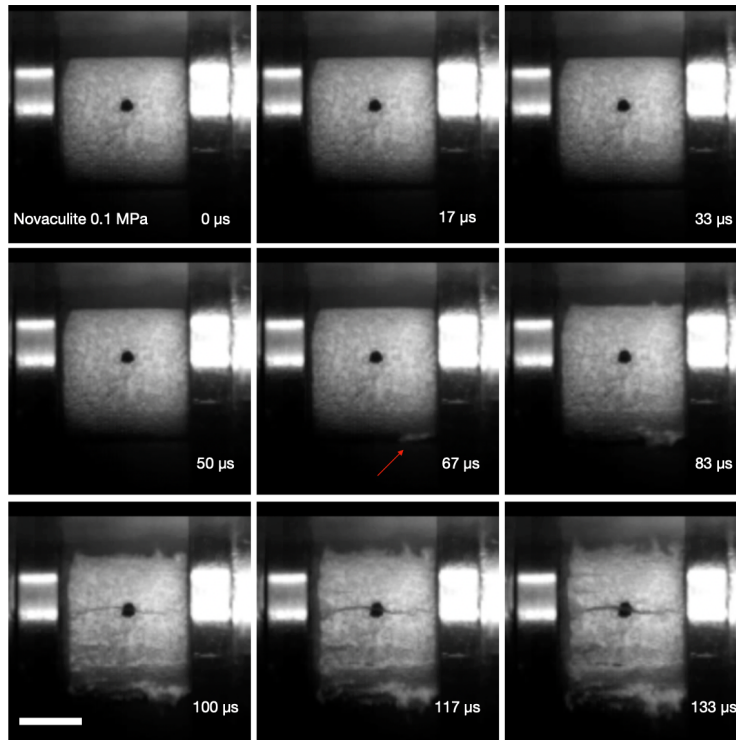


図5 ノバキュライト試料の動的粉砕挙動（衝突圧 0.1 MPa、撮影条件は図4と同じ）

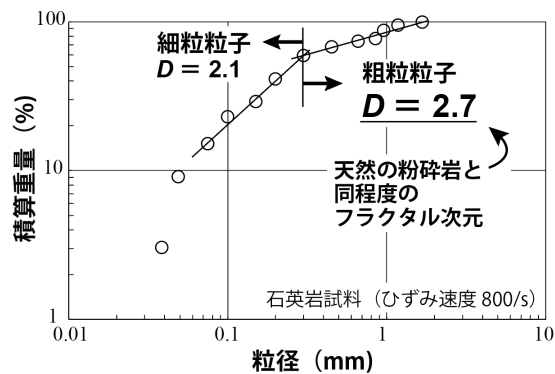


図6 実験で得られた粉砕試料のフラクタル特性（ノバキュライト試料）

参考文献:[1] Dor, O., Y. Ben-Zion, T. K. Rockwell, and J. Brune (2006), Pulverized rocks in the Mojave section of the San Andreas fault zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 642–654. [2] Wilson, B., T. Dewers, Z. Reches, and J. Brune (2005), Particle size and energetics of gouge from earthquake rupture zones, *Nature*, 434, 749–752. [3] Nagahama, H., and K. Yoshii (1993), Fractal dimension and fracture of brittle rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 30, 173–175. [4] Muto, J., T. Nakatani, O. Nishikawa, and H. Nagahama (2015), Fractal particle size distribution of pulverized fault rocks as a function of distance from the fault core. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3811–3819, doi:10.1002/2015GL064026. [5] Frew, D.J., Forrestal, M.J. and W. Chen (2002), Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar. *Exp. Mech.* 42(1), 93–106.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Jayawickrama Eranga G, Muto Jun, Sasaki Osamu, Nagahama Hiroyuki	4. 巻 126
2. 論文標題 Damage Evolution of Onnagawa Shale by Postmortem Thresholding of X Ray Computed Tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 1~22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB022056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jayawickrama Eranga G, Muto Jun, Sasaki Osamu, Nagahama Hiroyuki	4. 巻 19
2. 論文標題 The quantitative characterization of hydraulic fracture connectivity from a postmortem investigation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysics and Engineering	6. 最初と最後の頁 211~226
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/jge/gxac012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 関口拓真, Eranga Jayawickrama, 武藤潤, 河野義生, 長濱裕幸
2. 発表標題 岩石の高ひずみ速度下のダメージ評価に関する実験的研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河野 義生 (Kono Yoshio) (20452683)	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授 (16301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	武藤 潤 (Muto Jun) (40545787)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	丹下 慶範 (Tange Yoshinori) (70543164)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・主幹研究員 (84502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関