

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：11401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23654170

研究課題名（和文）高速進展する断層ラプチャー先端の応力場と破碎現象の解明

研究課題名（英文）Investigation of stress field and pulverization mechanism at the fault rapture front propagating at a high speed

研究代表者

西川 治（NISHIKAWA OSAMU）

秋田大学・工学資源学研究所・講師

研究者番号：90375220

研究成果の概要（和文）：地震性すべりにともなう岩石の粉碎現象を三軸圧縮試験機で再現し、そのメカニズムを考察した。まず、断層ラプチャー先端部が通過する際の局所的な応力場の変化を捉えるために、5 MHz で 10 チャンネルを同時観測出来るシステムを構築した。これにより、スリップ開始時に断層ラプチャーが S 波速度を超える速度で進展していることを確認できた。力学データと 3DX 線 CT 画像による割れ目解析の結果、非常に高い垂直応力下では、すべり発生時に強い引っ張り力が面全体に作用し、モード I 割れ目が多数形成されて激しく粉碎することが推定された。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the mechanism of rock pulverization around fault, a series of stick-slip experiment was conducted with a gas-medium triaxial apparatus, recording strains with 5 MHz sampling rate for up to 10 channels. The mechanical data confirmed a supershear velocity of the propagation of rapture front during large stick-slip. Fracture pattern in the pulverized cores shows obvious dependence on the slip direction. It is likely that anomalously high axial stress caused strong tension stress on the slip plane during slip resulted in pervasive mode I fractures.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：断層・固着すべり・応力場・ガス圧式三軸試験機・粉碎

1. 研究開始当初の背景

最近、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から、せん断を伴わない粉碎岩（パルバライズドロック）が断層の周りに広範囲に発達していることが報告された。この断層破碎のメカニズムに関して、断層ラプチャーが S 波速度を超えて進展する現象（スーパーシア）に伴う衝撃波によって粉碎された可能性が指摘されている。スーパーシアは、理論的には以前から予想されていたが、2000 年以降の地震で相次いで観測された。ラプチャー先端から伸びるマッハコ

ーンの S 波は距離減衰が小さいことから、地震動で周りの岩盤に大きなダメージを与える可能性があり、地震動災害に関連しても注目されている。これを受けて申請者らが行った高圧下での実験で、大音響を伴う固着すべりイベントでパルバライズドロックの組織に良く似た粉碎組織が形成されることを発見した。しかしながら、これまでの実験システムでは、力学データのサンプリング速度や観測点が不十分で、固着すべり発生時に生じるすべり面近傍の歪場の変化を精確にとらえることが難しかった。また、破碎組織の解

析においても、表面と一部の断面上の観察に限られ、3次元的に割れ目分布を把握することができなかった。

2. 研究の目的

本研究では、地震発生層の圧力条件下で地殻物質の固着すべり実験を実施し、パルバライズドロックを断層の周りに再現する。天然の断層と比較しながら破碎組織の解析を行い、破碎のメカニズムを明らかにする。従来のせん断破壊説だけでなく、すべり時の瞬間的な動的ひずみ変化をモニターすることにより地震動の影響についても検討する。これらを総合して、断層のダメージ形成の新しいモデルを構築する。

3. 研究の方法

実験では、ガス圧式三軸圧縮試験機を用い、地震発生層の圧力と比較し得る 180MPa の封圧下で、斜め 50 度にプレカットし鏡面磨きした 20mm×40 mm の試料を用いて固着すべり実験を行った。実験試料として、主として無水人工石英単結晶と天然メタチャートを使用した。力学データは、試料に貼り付けた複数の歪ゲージから収録される。固着すべりイベントは数十 μ 秒という極めて短時間の現象であり、動的変化をとらえるためにはこれに対応できる実験・データ収録システムの構築が重要である。

本研究では、まずデータ収録システムを改良し、シグナルを毎秒 500 万個の速度 (5MHz) で収録するシステムを構築した。このサンプリング速度ならば、ラプチャー速度を 5 km/s としても空間分解能が 1 mm に達するので、スーパーシアを実証できる条件が整う。

天然の断層観察のために、米国ロスアンゼルス近郊のサンアンドレアス断層、兵庫県の有馬一高槻断層、および福島県いわき市と秋田県内の活断層露頭のサンプリングをおこなった。粉碎岩試料は、薄片観察や SEM によるフラクトグラフィ解析の他、空間分解能 5 μ m 以下のマイクロ X 線 CT で割れ目の 3 次元解析をおこなった。

4. 研究成果

固着すべりの際の応力変化を 5 MHz で最大 10 チャンネルを同時観測出来る観測システムを構築した。これにより、断層ラプチャー通過の際のシグナルの変化がこれまでよりスムーズな曲線で表現され、その開始点がすべり面の末端部にあり、S 波を超える速度で面内全体に進展している様子が確認できた。大きな固着すべり発生時の軸応力は、350~500MPa に達した。

代表的な脆性材料の石英単結晶を用いた実験では、大きな固着すべりとともに、すべり面の周りで激しい粉碎現象が起きること

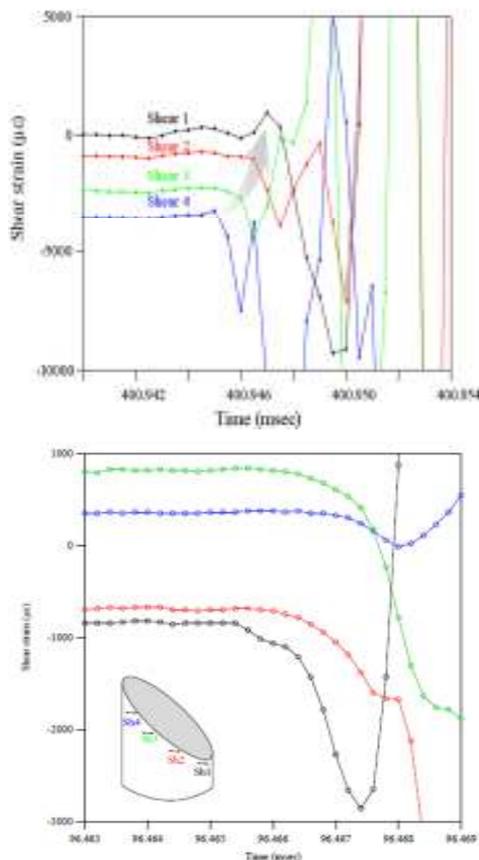


図1 固着すべり開始点前後のせん断ひずみのデータ. 0.2MHz のサンプリングレート(上図)に比べて 5MHz でサンプリングした場合(下図)は、変化曲線がスムーズで、イベントの開始時刻を明瞭に捉えている。開始時刻の系統的な遅れからラプチャーの進展速度が推定できる。また、開始点がコアの端点であることがわかる。

がこれまでの実験から明らかにされていた。実験試料としてメタチャート(細粒石英多結晶体)やガプロなどを組み合わせた場合では、割れ目の進展が粒界の影響を受け粉碎はある程度抑制されたが、石英単結晶と同様の粉碎組織が形成された。このことから、この現象は結晶質岩の断層ダメージとしては普遍的である。

実験後に回収されたコア形状は、すべり面付近が膨張した樽型であり、すべり方向に十数%以上引き伸ばされている。すべり面上には、細粒の破碎物とメルトからなる薄い層が形成されており、相当な距離をすべった後粉碎に至った可能性が高い。破碎物の表面性状観察から、破碎組織は断層のずれ運動によるせん断性の割れ目ではなく、引っ張りによって形成されたものであると結論される。

割れ目の卓越方向や密度分布などの把握には、コア試料の 3 次元 X 線 CT 画像が使われた。割れ目は、コアの外側の部分よりも芯部に集中している。外側の部分に発達する割れ目は、コアの円柱形状に平行な曲面をなす。

内側の割れ目の方向は、すべり方向に垂直～40度程度斜交し、すべり面付近では面に垂直、すべり面から遠ざかるにしたがってコア軸に平行な割れ目が卓越する。割れ目密度は、すべり面近傍で非常に高く、面から離れるにしたがって急速に低下する。また、すべり面近傍では、引きずりによって形成された2次的な割れ目が発達する。このような割れ目のパターンを反映し、ダメージの激しいすべり面上では、すべり方向に垂直なりッジ状の部分と破碎物のデブリに充てんされたクレバス状の部分の繰り返し発達する。すべり面上でのダメージの強さは不均質な分布を示す。

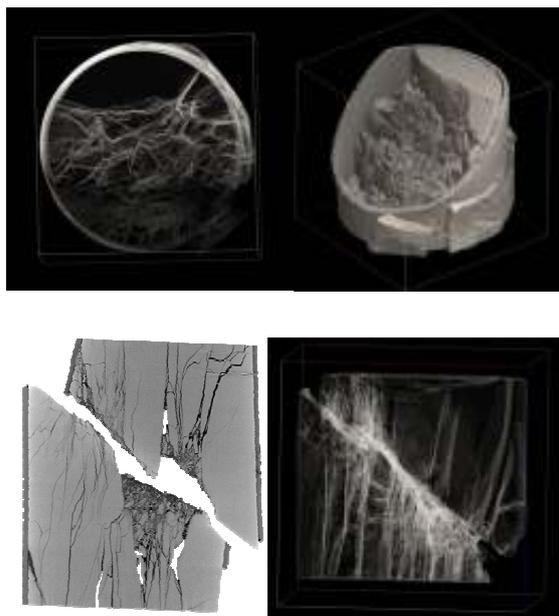


図2 回収されたコア試料のX線CT画像。
 左上：すべり方向（図の上下方向）に対して垂直な割れ目が卓越する。右上：中央部分が大きく破碎され、すべり方向に垂直なりッジが発達する。左下：大きく開口したクレバス状の割れ目の中にデブリが堆積している。上下盤で破碎度の大きな違いは見られない。右下：上盤に対して下盤の破碎度が著しく大きい。すべり面付近では引きずり構造が見られる。

実験と天然の破碎現象と比較するために、断層の周りにパルバライズドロックが報告されているサンアンドレアス断層と有馬高槻構造線、および通常の断層物質がみられる福島県と秋田県のフィールドにおいて破碎物の産状の観察と試料採取を行った。その結果、実験で得られた粉碎岩の組織の特徴は天然のパルバライズドロックのそれと共通点も多いが、割れ目分布の特徴が異なっていることがわかった。

以上の実験データと破碎物性状観察に基づいて、固着すべりに伴うダメージ形成メカニズムを考察する。固着すべり実験の力学データは、明らかにスーパーシアが起きていることを示している。スーパーシアラプチャー

の場合、モードII割れ目先端の応力場を反映して、割れ目の発達状態が上盤と下盤で非対称となる。しかしながら、今回の実験試料でそのような特徴を示すものは1試料のみであった。また、ラプチャー通過に伴う粉碎を経験したコアが、メルトを伴うような摩擦すべりを起こす能力を保持し続けることは考えにくい。スーパーシアラプチャーの可能性については、今後さらに検討する必要がある。

次に、摩擦すべりによる破碎の可能性について検討する。本研究では、すべり面のプレカットの角度は通常より大きい50度で行われた。そのため固着すべり発生時の軸応力は350MPa以上の非常に大きな値となり、700MPaを超えた例もあった。この軸応力を180MPaの封圧が支えるのは不十分であり、すべり面の近傍では、コアの外側に向かう引っ張りの力が働いて膨張が生じたと考えられる。一方、コア中心部の激しい破碎組織は、摩擦すべりの産物であると推定する。すなわち、すべり面内には大小のアスペリティが存在しており、非常に高い垂直応力下ですべりが発生したときには、アスペリティと周りの部分の間にすべり方向に平行な強い引っ張り力が作用したであろう。そのため、モードI割れ目が面全体に多数形成され、コア中心部が激しく粉碎したのである。このような破壊現象は、垂直・せん断応力比が非常に大きな場合に発生しうる断層のダメージゾーン形成のメカニズムとして重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- (1) O. Nishikawa, K. Furuhashi, M. Masuyama, T. Shiraishi, C-C. Shen, Radiocarbon dating of residual organic matter in travertine formed along the Yumoto Fault in Oga Peninsula, northeast Japan: Implications for long-term hot spring activity under the influence of Earthquakes. *Sedimentary Geology*, 査読あり 2012, 243-244, 181-190. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2011.11.001

[学会発表] (計5件)

- (1) O. Nishikawa, J. Muto, K. Otsuki, Analysis of fracture pattern of pulverized quartz formed by stick slip experiment. EGU 2013 general assembly,

2013, Vienna, Austria.

- (2) J.Muto , K.Nakatani , O.Nishikawa ,
H.Nagahama ,
Microstructures and grain size
distribution of pulverized fault rocks,
Water Dynamics-10, 2013,
Sendai, Japan.
- (3) 中谷 剣, 武藤 潤, 西川 治, 長浜 裕之
Pulverized Rock の微細構造：サンアンド
ドレアス断層と有馬高槻構造線
日本地球惑星科学連合, 2012,
幕張
- (4) 中谷 剣, 武藤 潤, 西川 治, 長浜 裕之
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, 2012,
大阪
- (5) O.Nishikawa , J.Muto , K.Otsuki ,
Pulverization of quartz single crystal
and natural quartzite induced by
possible super-shear rupture during
stick-slips, AGU Fall Meeting, 2011,
San Fransisco, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 治 (NISHIKAWA OSAMU)
秋田大学・工学資源学研究科・講師
研究者番号：90375220

(2) 研究分担者

大槻 憲四郎 (OTSUKI KENSHIRO)
東北大学・理学研究科・名誉教授
研究者番号：70004497

(3) 連携研究者

武藤 潤 (MUTO JUN)
東北大学・理学研究科・助教
研究者番号：40545787