

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年 5月25日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13582

研究課題名(和文)地質学的視点からみた地震アスペリティの実体解明

研究課題名(英文)Asperity of seismogenic faults from geological point of view

研究代表者

廣瀬 丈洋(HIROSE, Takehiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー代理

研究者番号：40470124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：断層面には、固着している部分(アスペリティ)とそうでない部分が存在する。アスペリティでは、地震間に歪が蓄積されて地震時に大きくずれることから、地震発生過程を解明する上でアスペリティの理解は重要である。本研究では、断層面に観察される鏡肌がアスペリティを担っている可能性を、地震断層鏡面の凸凹特性計測と摩擦実験によって検証した。その結果、断層鏡面はフラクタル特性を有すること、大理石の鏡面はすべり静止時間と共に摩擦強度が回復せず、地震の歪みを蓄えるような役割をアスペリティは担っていないことが明らかとなった。強度回復をしない摩擦特性を持つ鏡面は、断層クリープやスロー地震の発生に寄与しているかもしれない。

研究成果の概要(英文)：Real contacts of fault surfaces, called as asperity, is significant for understanding generation of earthquakes, because asperity is a potential site where strain energy of earthquakes is accumulated and released by coseismic slip during an earthquake. In this study, a hypothesis that slickensides (fault mirror surface) on a fault plane act as asperity of seismogenic faults is verified by measuring topographic characteristics of fault mirror surfaces corrected immediately after the earthquakes and by determining frictional property of marble mirror surfaces using a rotary shear apparatus. The results indicate that (1) mirror fault surface possess fractal property with fractal dimension of 1.06-1.29, and (2) strength of marble mirror surface does not recover when slip ceases. The fault mirror showing no frictional aging may be responsible for fault creep or slow earthquakes rather than asperity where strain energy is stored.

研究分野：固体地球科学

キーワード：鏡肌 断層 アスペリティ

### 1. 研究開始当初の背景

地震時の断層面では、大きくすべて地震波を発生させる場所や、逆にすべりが起こらず応力が大きくなる場所が存在するなど非常に複雑多様である。このような多様な地震発生現象を説明するための「アスペリティ・モデル」が1980年頃に提唱された(Kanamori & Stewart, 1976)。アスペリティとは本来物質表面の引っ張り(凸)を意味している。「断層面ではところどころ摩擦抵抗の大きな凸の部分があり、それがすべった際に大きな地震が起こる」というのがこのモデルの肝である。このモデルが提唱されて以降、天然の断層面の幾何(凸凹)特性に関する研究が盛んに行なわれてきた(Brown & Scholz 1985; Candela et al. 2012)。しかし、多くの断層は断層運動後の風化・変質の影響を被っており、これまでの研究では地震時の断層面の幾何学特性を探ることは難しかった。

一方、実験によって断層面の凸凹が断層運動に与える影響も1980年頃から調べられてきた(Goebel et al. 2014)。しかし、これらの実験的研究では、自然界の高速(数m/s)で大変位運動(>10m)をする地震断層運動を再現できておらず、断層面の凸凹が“地震性のすべり挙動”におよぼす影響は評価しきれていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の問題を克服するために、(1)2011年4月のいわき地震直後に採取された鏡肌を含む断層面の幾何・物質学的特徴を調べ、(2)その特徴を摩擦実験によって再現し、鏡肌が断層の力学的性質に与える影響を調べることである。そして、断層面に観察される鏡肌がアスペリティ(断層固着部)を担っているという仮説を検証したい。断層面には、固着している部分(アスペリティ)とそうでない部分が存在する。アスペリティでは、地震間に歪が蓄積され、地震時に大きくすべることから、地震発生過程を解明する上でアスペリティの理解は重要である。アスペリティの実体解明は、地震学と地質学を有機的に結びつけ、より現実的な地震発生メカニズムの解明につながることを期待される。

### 3. 研究の方法

地震断層面の幾何学的特徴を把握するために、2011年東北地方太平洋沖地震後に内陸側での正断層運動によって地表に現れた井戸沢断層、2014年長野県北部地震の低角逆断層運動によって露出した神城断層、そして、サンフランシスコのコロナハイツパーク内に露出しているコロナハイツ断層、の3種類の試料を用いた。井戸沢断層と神城断層の試料は、地震発生直後約2週間後に採取された試料であり、地震時の断層面の形状情報がよく保存されていると考えられる。コロナハイツ断層は先行研究によって断層表面の鉱物

組成や微細組織が詳しく調べられている試料である。すべての試料に、光沢のある鏡面およびその上に複数の方向を示す線構造が確認された。

本研究では、これまで連続的に解析されてこなかった1nmから33mmのスケールでの断層面の形状を、走査型プローブ顕微鏡(1nm~50μm)、共焦点顕微鏡(計測スケール:0.15μm~3mm)、3D測定マクロスコープ(計測スケール:1.3μm~33mm)を組み合わせることによって計測した。形状計測は高さ情報をもつ画像として得られる。形状特性の解析は、条線に直交する方向と平行な方向に断面図を取り出し、両方向について行った。得られた高さ情報データは、RMSによる見かけの粗さの解析と、スペクトル解析を行い、パワースペクトル密度を求めることで、ハースト指数H(0<H<1は自己相似、1<Hは自己アフィン)とフラクタル次元Dを指標にして表面形状のフラクタル特性の解析を行った。

鏡肌の力学的性質を探るために、大理石(イタリア・カララ産)を用いて摩擦実験によって鏡肌を再現し、その摩擦特性を調べた。大理石を用いたのは、天然試料を実験試料フォルダーに合わせるように加工するのが難しかったことと、鏡肌を再現できる条件がこれまでの経験からあらかじめわかっていたためである。実験には、海洋研究開発機構高知コア研究所に設置されている回転式低~高速試験機を用いた(図1)。本研究では、鏡肌の摩擦特性、特に摩擦強度回復過程をスライド・ホールド・スライド(SHS)試験によって調べた。実験では、鏡肌(FM)、鏡肌を壊した断層ガウジ(CF)、大理石の摩擦ガウジ(BR)の3種類の模擬断層帯でSHS試験を行い、その結果を比較した。実験条件は、すべり速度1μm/s、垂直応力1MPa、ホールド(静止)時間3~6760秒、すべり変位0.64~2.22mmで、室温(25~28℃)、湿潤(34~37%)もしくは乾燥窒素ガスを流した乾燥条件下で実験を行った。

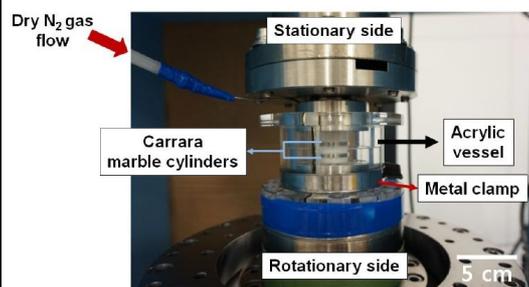


図1: 回転式低~高速試験機の試料部。2組の円筒形大理石試料を組み合わせ、接合部を模擬断層と仮定して、その摩擦を計測。上側から垂直荷重、下側が回転することによって断層すべりを再現。乾燥条件を再現する際は、乾燥窒素ガスをアクリル試料容器内に流し続ける。

#### 4. 研究成果

(1) 地震断層面の形状特性解析の結果、RMS の値は観察スケールが大きくなるほど累乗で大きくなったが、井戸沢断層と神城断層では、条線方向に平行な方向で 750  $\mu\text{m}$  から 3 mm のスケール領域で、RMS と観察スケールの相関関係から外れるほど粗い面が混在していることがわかった。さらに、各断層面のスペクトル解析結果から求められたフラクタル特性は、井戸沢断層は条線に直交方向で  $H = 0.97 \pm 0.00$  ( $D = 1.03 \pm 0.00$ )、平行方向で  $H = 0.94 \pm 0.00$  ( $D = 1.06 \pm 0.00$ )、神城断層では  $H = 1.01 \pm 0.00$  ( $D = 0.99 \pm 0.00$ )、 $H = 0.71 \pm 0.01$  ( $D = 1.29 \pm 0.01$ )、コロナハイツ断層は  $H = 1.06 \pm 0.01$  ( $D = 0.94 \pm 0.01$ )、 $H = 1.06 \pm 0.00$  ( $D = 0.94 \pm 0.00$ ) という結果がえられた。すべての断層面について、おおよそ 1 というハースト指数をもつため、これらの断層面は非常に自己相似フラクタルに近い自己アフィンフラクタルであるといえる。さらに、Candela et al. (2012) の 50  $\mu\text{m}$  から 50 km にわたるスペクトル解析の結果と本研究結果を比較することで、ナノメートルスケールからキロメートルスケールの領域においてフラクタル特性が一貫することがわかった (図 2)。

コロナハイツ断層は数 100 nm から数 10 mm のスケール領域において、条線とスリッケンステップによるものと考えられる異方性がみられた。RMS 解析時に、井戸沢断層や神城断

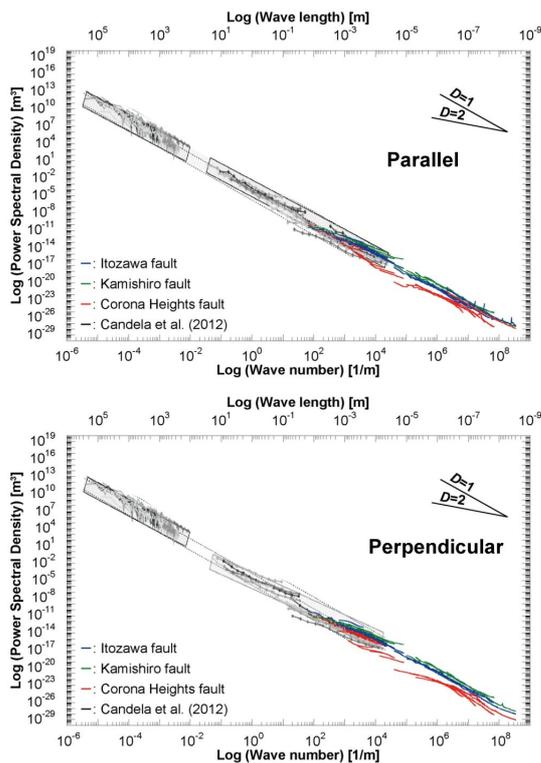


図 2: 地震断層面の nm スケールから km スケールの領域におけるフラクタル特性。上図は条線に平行、下図は条線に垂直な方向での解析結果。

層にも数 100 nm から数 mm のスケール領域において、特徴的な形状が確認できたことを考慮すると、この微小なスケール領域において断層ごとの個性があらわれ、その他のスケール領域とは異なる形状特性をもつ可能性が示唆される。この長さスケールは、断層母岩中の鉱物の粒形の大きさとほぼ同じであることから、母岩中の鉱物の硬さの違いの影響がこのスケールでの形状特性に効いているのかもしれない。

(2) 大理石鏡面の力学特性を調べるための SHS 試験の結果、湿潤下の実験では、鏡肌以外の試料 (CF と BR) では静止時間のべき乗で定常摩擦係数が増加することがわかった (図 3)。これは、Dietrich (1972) で報告された岩石の強度回復傾向と一致している。しかし、鏡肌の試料 (FM) は、静止時間と共に若干定常摩擦係数が減少する傾向が確認された。窒素ガスを用いた乾燥条件においては、湿潤下と比較すると、CF と BR は定常摩擦係数の強度回復速度が少し小さくなり、一方鏡肌の試料 (FM) は若干強度回復する傾向が確認された。これらの結果から、CF と BR は断層面近傍に水分が存在することによって強度回復速度が速くなること、鏡肌 (FM) は水分

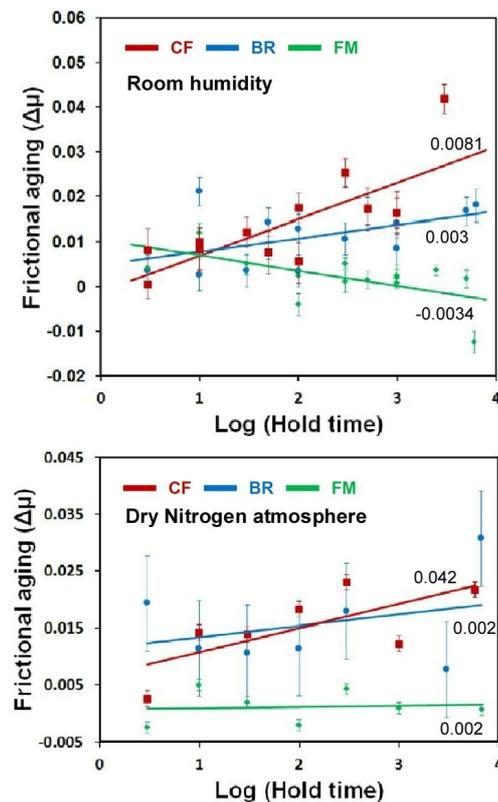


図 3: 大理石の SHS 試験の結果。上図が湿潤下、下図は窒素ガスで充填した乾燥条件下での実験結果。図中の数字は強度回復速度。Dietrich (1972) のべき乗則を使って実験データをフィッティング。FM: 鏡肌, CF: 鏡肌を壊したガウジ, BF: 大理石を摩耗させてつくったガウジ。

が存在することによって、強度回復速度が若干小さくなりほとんど強度回復しなくなることがわかった。鏡肌は、焼結ナノ粒子で形成されていることが透過・走査電子顕微鏡観察から明らかになったが、何故焼結ナノ粒子がほとんど強度回復をしないのかまでは解明することができなかった。ナノ粒子の流動強度が真実接触域の増加速度、すなわち強度回復速度を決めていると思われるので、焼結ナノ粒子の物性を決定することが今後の課題である。

以上2つの研究から、地震断層面上に形成された鏡肌の凸凹特性は、自己相似フラクタルに近い自己アフィンフラクタルであり、cmより大きな長さスケールでの形状特性とほぼ一致してくること、そして大理石鏡肌の場合、摩擦強度回復が起こりえない、つまり地震の応力を蓄えるようなアスペリティにはなりえないことが明らかとなった。断層鏡肌は、断層クリープやスロー地震などの非地震性の断層すべりを引き起こす要因であるかもしれない。

#### <引用文献>

- Brown and Scholz (1985) Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *J. Geophys. Res.*, 90, 12575-12582.
- Candela, T., Renard, F., Klinger, Y., Mair, K., Schmittbuhl, J. and Brodsky, E.E. (2012) Roughness of fault surfaces over nine decades of length scales. *J. Geophys. Res.*, 117, doi.org/10.1029/2011JB009041.
- Dietrich, J.H., (1972) Time dependent friction in rocks. *J. Geophys. Res.*, 77, 3690-3697.
- Goebel, T. H. W., C. Candela, C. G. Sammis, T. W. Becker, and G. Dresen (2014) Seismic events distributions and off-fault damage during frictional sliding of saw-cut surfaces with predefined roughness. *Geophys. J. Int.*, 196, 612-625.
- Kanamori, H., and G. S. Stewart, (1976) Mode of the strain release along the Gibbs fracture zone, Mid-Atlantic Ridge, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 11, 312-332.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

- Kitamura, M., and T. Hirose, Strength determination of rocks by using indentation tests with a spherical indenter, 査読有, *Journal of Structural Geology*, 98, 1-11, doi:0.1016/j.jsg.2017.03.009.
- 林 為人・廣瀬 文洋・谷川 亘・濱田 洋

平, 科学掘削による地震断層の応力状態・物性・すべりパラメーターの評価, *地学雑誌*, 査読有, 126, 2017, 223-246, doi:10.5026/jgeography.126.223.

Mizoguchi, K., and T. Hirose, Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 43, 2016, 7921-7927, doi:10.1002/2016GL069776.

Oohashi, K., T. Hirose, M. Takahashi, and W. Tanikawa, Dynamic weakening of smectite-bearing faults at intermediate velocities: Implications for subduction zone earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 120, 2015, 1572-1586, doi:10.1002/2015JB011881.

[学会発表](計10件)

- Kazuo Mizoguchi, Takehiro Hirose, Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, 2017年12月14日, ニューオーリンズ, アメリカ合衆国.
- Yohan Park, Jin-Han Ree, Takehiro Hirose, Anti-aging Friction of Carbonate Fault Mirror and its Microstructural Interpretation, American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, 2017年12月14日, ニューオーリンズ, アメリカ合衆国.
- 川口健太, 早坂康隆, 廣瀬文洋, 四国中央部三波川変成帯猿田川流域におけるナップ境界近傍の温度構造と年代分布, 日本地質学会第124年学術大会, 2017年9月18日, 愛媛大学, 愛媛県松山市.
- 村山寛樹, 金川久一, 澤井みち代, 廣瀬文洋, 大気中およびアルゴン雰囲気下における中速域のめのうの摩擦強度, 日本地球惑星科学連合2017年大会, 2017年05月21日, 幕張メッセ, 千葉県千葉市.
- Yohan Park, Jin-Han Ree, Takehiro Hirose, Frictional 'non-aging' of fault mirror surfaces?: Insight from friction experiments on Carrara marble, American Geophysical Union, Fall Annual Meeting, 2016年12月13日, サンフランシスコ, アメリカ合衆国.
- 阿部なつ江, 廣瀬文洋, 多田井修, かんらん石の蛇紋石化に伴う海洋下部地殻斑れい岩類の弾性波速度変化, 日本鉱物科学会2016年年会, 2016年09月23日, 金沢大学, 石川県金沢市.

安東淳一，西脇隆文，佐藤琢，長岡  
昂吉，鍵裕之，廣瀬丈洋，大藤弘明，  
鏡肌の形成過程，日本鉱物科学会 2016  
年年会，2016 年 9 月 23 日，金沢大学，  
石川県金沢市。

Jae Hoon Kim, Jin-Han Ree, Takehiro  
Hirose, Kiho Yang, Jin-wook Kim,  
Snowball gouge-aggregates formed in  
experimental fault gouges at seismic  
slip rates, American Geophysical  
Union, Fall Annual Meeting, 2015 年  
12 月 16 日，サンフランシスコ、アメリ  
カ合衆国。

岸田実紀，溝口一生，高橋美紀，廣瀬丈  
洋，ナノからミリスケールにおける地震  
断層面の形状特性：井戸沢断層と神城断  
層の解析結果，日本地質学会第 122 年学  
術大会，2015 年 09 月 11 日，信州大学，  
長野県松本市。

北村真奈美，曾根大貴，北島弘子，廣  
瀬丈洋，南海付加体内部の粘弾性特性：  
掘削カッティングス試料を用いたイン  
デンテーション試験による解析，日本地  
球惑星科学連合 2015 年大会，2015 年 05  
月 24 日，幕張メッセ，千葉県千葉市。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 丈洋 (HIROSE, Takehiro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知  
コア研究所・グループリーダー代理

研究者番号：4 0 4 7 0 1 2 4

### (2) 連携研究者

富岡 尚敬 (TOMIOKA, Naotaka)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知  
コア研究所・主任技術研究員

研究者番号：3 0 3 3 5 4 1 8

高橋 美紀 (TAKAHASHI, Miki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・活  
断層・地震研究センター・主任研究員

研究者番号：4 0 4 7 0 0 3 3

### (3) 研究協力者

岸田 実紀 (KISHIDA, Minori)

溝口 一生 (MIZOGUCHI, Kazuo)

パク ヨハン (PARK, Yohan)