

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13877

研究課題名(和文) 高時空間分解度での高速すべり摩擦面の直接観察

研究課題名(英文) Direct observation of frictional contacts during high-velocity slip

研究代表者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：30511969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：高速せん断中の接触点温度と強度の関係を明らかにするために、高時空間分解能での温度分布の直接測定に取り組んだ。我々は、高速せん断される摩擦面の真実接触点の発熱による発光を高速カメラで撮影し、2色温度計の原理を適用することでコンタクトの温度を推定することに成功した。接触点の最高温度は常圧での試料の融点を越え2500 程度まで上昇していたが、これは真実接触点が数GPa程度の高圧であることを考えれば不思議ではない。

研究成果の概要(英文)：Recent experiments conducted at sub-seismic to seismic sliding velocities (mm/s to ms) show the dramatic weakening in the friction coefficient for a wide variety of rock types due to mechanochemical effects by frictional heating. Consequently, several weakening mechanisms have been proposed depending on the type of rock specimens. Some of them are based on the sample observation and analysis after experiments. Direct observation of frictional contacts during an experiment is indisputable to constrain an elementary process at frictional contacts during slip. We developed experimental system for direct observation of frictional contacts during high velocity sliding experiment. We observed flash lightning at frictional contacts during high-velocity slip. We successfully measured the temperature distribution of microscopic contacts using two-color method.

研究分野：実験地震物理学

キーワード：高速摩擦 閃光発熱 可視化 真実接触点

1. 研究開始当初の背景

ほとんどの地震は既存断層の破壊すべりとして発生する。破壊すべりのダイナミクスを左右する破壊成長抵抗は摩擦に支配される。そこで、種々の岩石を用いて摩擦法則を調べる実験が行われてきた。過去 40 年の間に、Dieterich et al. (1978)の実験をはじめ多くの岩石実験を通して速度状態依存摩擦法則 (Rate- and State-dependent Friction law; RSF) が確立した。RSF は岩石に限らず多くの材料で成立する。RSF では摩擦係数は速度の対数に比例し、この対数依存性は接触点の熱活性化クリープ (Brecht and Estrin, 1994; Nakatani, 2001; Nakatani, 2006)で説明されている。

一般に固体と固体を接触させると、どんなに平らな面でも微小な凸凹によって、無数の微視的な点で接触し、真実接触面積はみかけの接触面積よりもはるかに小さい。接触面の摩擦はこの無数の接触点の面積とその強度によって支配される (Bowden and Tabor, 1964)。Dieterich and Kilgore (1994)は透過光学系を用いてこのマイクロな真実接触点の可視化に成功した。接触点の典型的なサイズは $L = 1\sim 100\mu\text{m}$ 程度で真実接触面積はみかけの接触面積の 1,000-10,000 分の 1 のオーダーであり、この接触点で支えている圧力は非常に高く、物質の降伏強度に達していると考えられている。

近年、地震の断層運動時の 0.1-1m/s オーダーのすべり速度では、接触点での摩擦発熱 (閃光発熱, Flash heating) の重要性が理論的、実験的に指摘されている (Rice, 2006; Goldsby and Tullis, 2011)。岩石の真実接触点のせん断強度 τ は降伏強度と同じオーダーで 10GPa 程度である。せん断される接触点が接触している寿命 ($\theta = L/V$) の間の接触点の単位面積あたりの発熱量は $q = \tau V\theta$ である。せん断速度 V が小さい場合には接触点で発生した熱は接触寿命の間にあつという間に周囲に拡散してしまい、接触点の温度もあまり上昇せず、接触点の強度もほとんど影響を受けない。しかし、せん断速度が熱拡散に比べて十分早ければ、接触寿命の間に接触点の温度は相当上昇し、例えば融点に達して熔融するなどして強度に影響を与えるだろう。実際に 0.1-1m/s オーダーの高速摩擦実験で摩擦係数が大幅に低下することが種々の岩石で報告されている (嶋本ほか, 2003; Di Toro et al., 2011)。多くの場合は熱的な効果と解釈され、実験後の試料観察から種々のメカニズムが提案されているものの、物質依存の個別的な解釈にとどまっているのが現状である。

2. 研究の目的

本課題では筆者は高速せん断中の真実接触点の温度分布を直接測定することで、高速摩擦を支配する局所発熱する接触点の強度と微視的物理過程の解明を目指した。

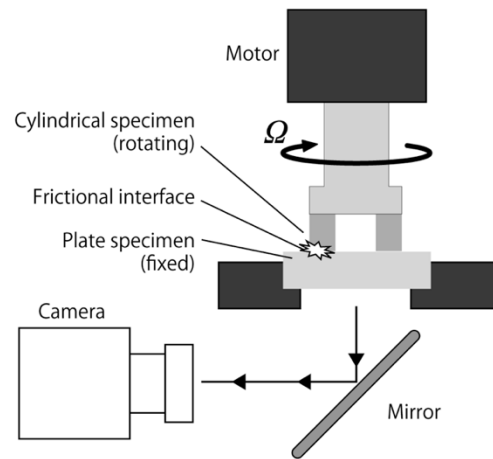


図 1 Experimental setup for direct observation of the frictional interface.

3. 研究の方法

本研究では回転式レオメーターを用いたせん断試験機 (図 1) を用いた。上部の円筒形状に整形した試料を下部の板状試料に押しつけて回転させる。円筒試料と板状試料との接触面は外径 $D_2=10\text{mm}$ 、内径 $D_1=6\text{mm}$ である。回転する側の円筒状試料は石英ガラス、固定側の板状試料は厚み 5mm のサファイアガラスを使用した。一定垂直荷 0.3MPa の下で摩擦実験を実施した (図 2)。本研究ではせん断速度は等価せん断速度 $V = (\Omega/3) (D_2^3 - D_1^3) / (D_2^2 - D_1^2)$ で表し、 $V=1\text{m/s}$ で実験を行った。 Ω は試料回転の角速度である。透明な板状試料の下部に設置したミラーを通してせん断面を観察できる。

本研究ではカラー高速カメラ (FASTCAM Mini AX200, Photron 社製) を用いて、二色温度法を適用しピクセル毎の温度分布を求めた。フレームレートは 1,000fps、露光時間は 1msec、画素分解能は $20\mu\text{m}/\text{px}$ である。ミラーとして可視光の広い帯域で高反射率を持つ超広帯域誘電体多層膜ミラーを使用した。

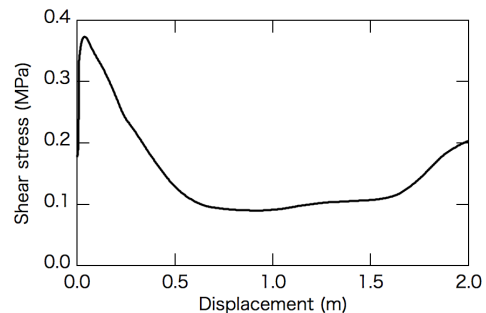


図 2 Shear stress measured at a slip velocity of 1m/s under a normal stress of 0.3MPa. Slip velocity before displacement = 0 was 1mm/s.

プランクの法則から、温度 T の黒体から放射される分光放射輝度 B は、波長 λ において

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (\text{式 1})$$

と表わせる。ここで c_1 , c_2 は放射定数で、プランク定数 h , 光速 c , ボルツマン定数 k を用いて、 $c_1=2hc^2$, $c_2=hc/k$ となる。放射輝度は短波長側 ($\lambda \ll c_2/T$) で成り立つ Wien の近似式を用いると

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (\text{式 2})$$

となる。実際の物質は理想的な黒体ではなく、その輝度は物質の放射率 ε を用いて $\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T)$ となる。一般的な単一波長で測定する放射温度計やサーモグラフィは放射率の影響を受ける。二色温度法では二波長の輝度の比を用いることで放射率の仮定なしに温度を推定することができる。放射率が波長によらず一定である(灰色体仮定)とすると輝度比 R は

$$R(T) \approx \frac{B(\lambda_1, T)}{B(\lambda_2, T)} = c_3 \cdot e^{-c_4/T} \quad (\text{式 3}),$$

$c_3=(\lambda_1/\lambda_2)^5$, $c_4=(\lambda_1\lambda_2)/(\lambda_2-\lambda_1)$ となり、放射率を仮定せずに輝度比から温度を推定することが可能になる。

本研究ではカラー高速カメラで得られた可視画像の各ピクセルの赤色チャンネルと緑色チャンネルの比(G/R 比)を取ることで温度を推定する。実際のカメラの各色のチャンネルの感度特性は有限の幅を持っているので、測定に用いるカメラ、レンズ、フィルターの組合せ毎に校正が必要となる。今回は鎌田ほか(2009)を参考に、光学用ハロゲンランプ(12V-75W)を放射温度計(チノー, IR-HQH)の2色モードで測定することで基準熱源とした。この基準熱源を、カラー高速カメラと測定

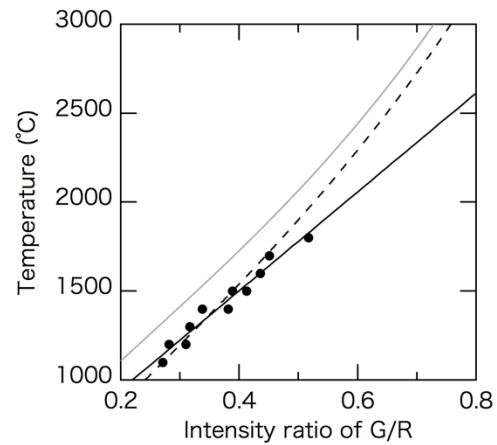


図 3 Relationship between the temperature and the intensity ratio of Green to Red. Gray line: Theoretical curve for $\lambda_1=547$, $\lambda_2=620$ nm (equation 3). Black broken line: Theoretical curve expected for the spectral response of the camera (Photron FASTCAM Mini AX200). Black dot: Data. Black line: Calibration curve (linear fit).

に使用するレンズの組み合わせで、実験に用いる透明な下部試料を通して撮影し 1000°C から 2000°C の範囲で測定値を直線でフィッティングすることにより校正を行った(図 3)。比較のために図 3 には $\lambda_1=547$, $\lambda_2=620$ nm とした場合の式 3 による理論曲線と、今回使用したカメラの分光感度特性とプランクの法則から計算した曲線も示した。測定値はカメラの分光感度特性を考慮した曲線と調和的であったが、今回は単純に校正曲線を外挿することで 2000°C 以上の温度域を含む G/R 比 0.2-0.8 の範囲で温度を推定した。

4. 研究成果

図 4 は 1m/s でせん断される摩擦面を直接撮影した可視化画像の例である。摩擦発熱による局所的な温度上昇で発光したスポットが移動していくのが分かる。この例では発光ス

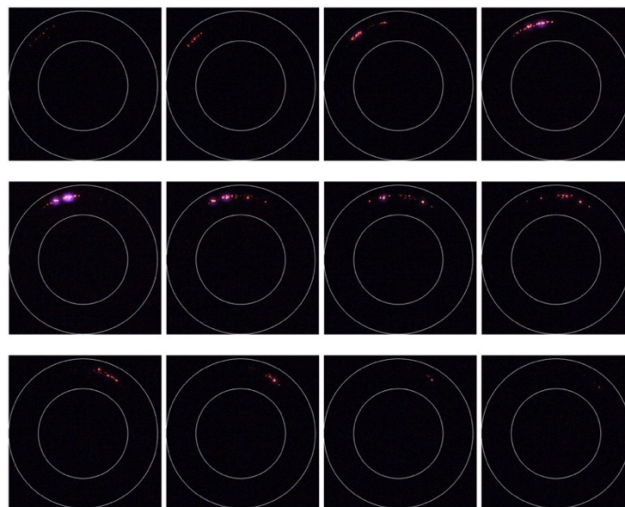


図 4 Snap shots of the frictional interface. The cylindrical specimen rotates clockwise at $V=1$ m/s. Interval between images is 1msec.

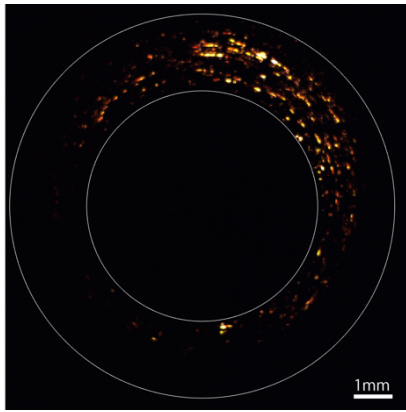


図5 Combined visible image of maximum brightness of each pixel during 1m/s slip for 1.6sec.

ポットの寿命は 10msec 程度であった。これは接触点サイズを 0.1mm とした場合に期待される接触寿命 0.1msec と比べて桁違いに長い。この原因のひとつとして、複数回の接触をフレームレート 1,000fps では分解しきれていないことが考えられる。ここでサイズ L の接触点が平均間隔 $\#$ で分布している単純なモデルを考えると、接触点の降伏強度を 6GPa として、マクロな垂直応力は 0.3MPa であるので、平均間隔と接触点サイズの関係は $\# = 141L$ となる。 $L < 7\mu\text{m}$ なら 1 フレームでの移動量 1mm の間に複数回接触することになる。この複数回接触の効果の他にも、発熱スポットの移動速度は回転面の移動速度 6 割程度で、すなわち、固定面と回転面のどちらの表面にも固定されていないことを考えると、二面間に摩擦物が存在して二面間を転がるように移動する効果も考えられる。撮影のフレームレートとピクセル分解能を上げて、接触点のサイズ分布を明らかにするためのより詳細な観察が必要である。

図5は 1m/s でせん断される摩擦面を約 1.6 秒の間撮影した動画像のピクセル毎の最大輝度を合成した可視画像である。発光点の分布が偏っているのは、接触面の平行度が良好でないためである。発光点のサイズは 100 μm 程

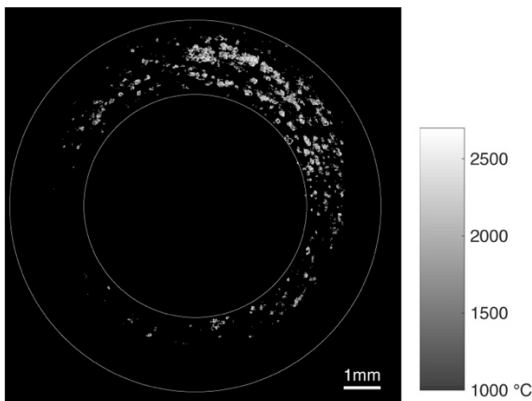


図6 Combined thermal image of maximum temperature of each pixel estimated by the two-color method.

度であり、回転方向に伸びている。可視光で発光が見えるほどの高温の接触点だけであるが、まばらな接触点で局所的に発熱していることが分かる。図6は約 1.6 秒間の動画から二色法によって温度を推定し、ピクセル毎の最高温度を合成した熱画像である。温度は常圧での石英ガラスの軟化点、融点 (~1650°C) を越えている点も多く、外挿した温度レンジであるが最高温度は約 2600°C に達していた。接触点の圧力が数 GPa 程の高圧であることを考えれば説明可能である (Rempel and Weaver, 2008)。

カラー高速カメラを用いた二色法では可視光の波長域を使用しているため実用的には 1000°C 以下の温度には適用できない。そこで、中赤外領域の高速赤外線カメラ (FAST M2k, Telops 社製) を使用し、1000°C 以下の温度を測定した。赤外領域を観察するためにミラーは赤外域の広い帯域で高反射率を持つゴールドミラーを使用した。測定結果の一例を図7に示す。前述の二色法と同じく垂直荷重 0.3MPa、すべり速度 $V = 1\text{m/s}$ でのせん断実験である。撮影のフレームレートは 1,000fps、露光時間は 6 μsec である。低温側は実験室の温度 25°C から測定できているが、高温側は高くても約 200°C であり、二色法で得られた温度よりもはるかに低い。これは放射率の影響もあるが、主として発熱点のサイズが高速赤外線カメラの画素分解能 120 $\mu\text{m}/\text{px}$ よりも小さいことによる効果と考えられる。1 波長の放射輝度に基づく測定では、ピクセル当りの放射輝度で温度を推定するので、高温の領域が 1 ピクセルよりも小さい領域だった場合、みかけの放射輝度は 1 ピクセルで平均化されて小さくなり、結果として推定される温度も低くなってしまふ。それに対して、前述した放射輝度の比を用いる二色法ではこのようなサイズの影響によるみかけ輝度低下の影響を受けないので、真実接触点の局所的発熱は、二色法での測定が適している。1000°C 以下の温度測定には高速赤外線カメラの波長域が適している。高速赤外線カメラで二色法を適用するための手法開発は今後の課題である。

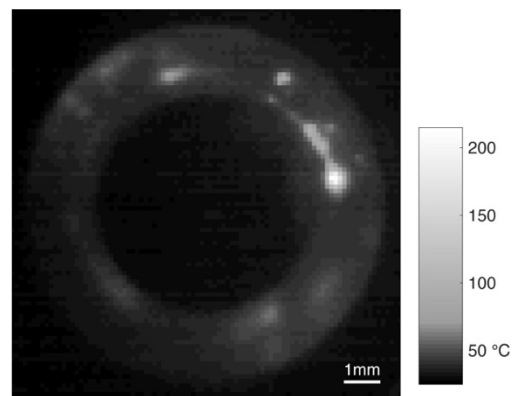


図7 Snap shot of the thermal image obtained with a high-speed IR camera (Telops, FAST M2k).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 桑野修, 2018, 高速せん断される摩擦接触面の発熱の可視化—断層高速摩擦の素過程解明を目指して—, 可視化情報学会誌, 38 巻, 149 号, p. 65 -68. (査読なし)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Osamu Kuwano, Direct observation of frictional contacts during high-velocity slip, 2017 AGU Fall Meeting, 2017. 12. 15.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・

数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：30511969