

## 岩塩の摩擦に及ぼす摩耗の影響 Effects of wear on friction of rock-halite

東大・農（正）\*山口 哲生 東大・農（非）Chengrui Chang

Tetsuo Yamaguchi\*, Chengrui Chang\*

\*The University of Tokyo

### 1. はじめに

粉体層にせん断を加えたときに生じる摩擦現象は、地震や地すべりなどの自然現象のほか、農作物の搬送や食品加工、金属/高分子材料の製造などにも見られる。本研究では、岩塩からなる粒子系を用いて摩擦実験を行ったところ、粒子が激しく摩耗するとともに、特徴的ななじみ挙動を示すことが分かった。そこで、摩擦実験、X線CTによる内部構造観察、Holm理論<sup>1)</sup>を拡張した数理モデルを併用することで、現象のメカニズム解明を試みた。<sup>2)</sup>

### 2. 実験

#### 2.1 試料

本実験には、異なる粒子径をもつ（粗粒：2-5 mm，微粒：0.425-0.85 mm）2種類の岩塩粒子を用いた。

#### 2.2 摩擦実験

装置の概略図を Fig.1 に示した。実験装置（リングせん断試験装置、京都大学防災研究所）は上部と下部に分かれている。上部は回転しないよう固定されており、粉体層の垂直荷重を作用させる。一方、下部が一定外周速度  $V = 0.05 \text{ cm/s}$  で回転することで封入された粉体層にせん断がかかり、上部と下部の境界付近（図中ギャップが開いている部分、実際にはゴムでシールされている）で摩擦を起こす。回転の際のトルク  $M$  を測定し、測定用のアームの長さ  $L$  と垂直荷重  $F_N$  から、次の式を用いて摩擦係数を算出した。

$$\mu = \frac{M}{LF_N} \quad (1)$$

本研究では（垂直荷重のかわりに）3種類の法線応力  $\sigma = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $0.6 \text{ MPa}$ ,  $1.0 \text{ MPa}$  を与えた。また、室温、湿度約 70% の条件で実験を行った。実験を開始した後の外周の移動距離をすべり変位  $\delta$  とし、 $\delta = 2 \text{ m}$  で実験を終了した。

#### 2.3 X線CTを用いた内部構造観察

摩擦実験を行った後装置上部を引き上げて摩擦した粉体試料を採取し、X線CT装置（Versa XRM-500 X-ray microscope）を用いて内部構造の観察を行った。

### 3. 結果と考察

Figure 2(a)に、粗粒を用いた場合の摩擦係数—すべり変位曲線を示した。

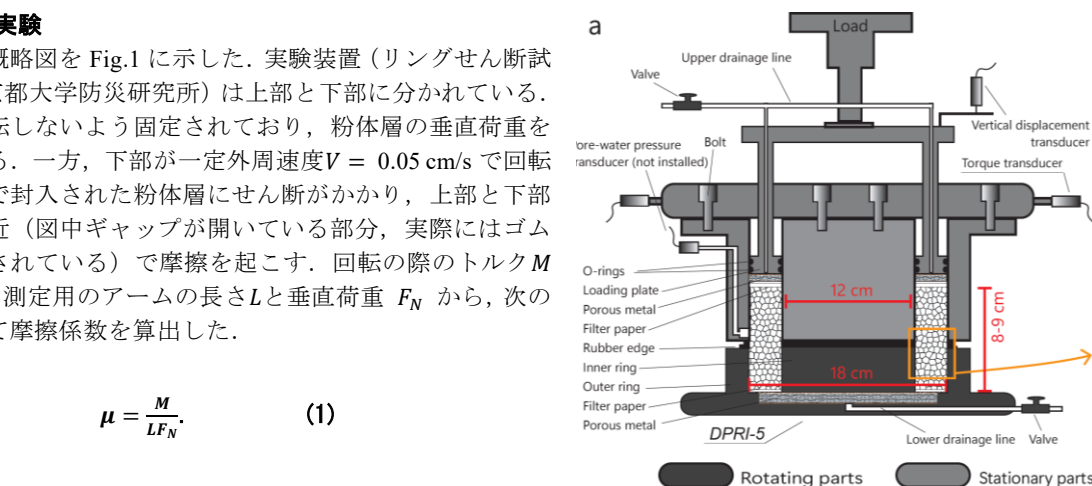


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

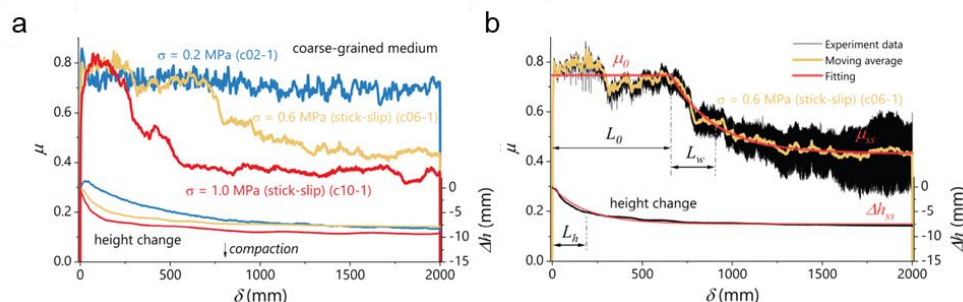


Fig. 2 (a) Displacement - Friction curves for coarse particles at 3 different normal stress. (b) Characterization of frictional curve.

摩擦係数  $\mu$  は、すべり開始直後はあまり変動しないが、その後減少していく挙動が観察された。また、摩擦係数がほぼ一定となる変位、減少に要する変位は、いずれも法線応力が大きくなるにつれて減少した。

この挙動を定量化するため、Fig.2(b)のように、摩擦開始直後を摩擦力一定の直線、その後の減少挙動を指数関数を用いてフィッティングし、各々の特徴的長さを  $L_0$ ,  $L_w$  として抽出した。

Figure 3 には、 $L_0$ ,  $L_w$  と法線応力  $\sigma$  との関係を両対数プロットした。なお、グラフには、粗粒、微粒両方の結果を重ねて表示した。

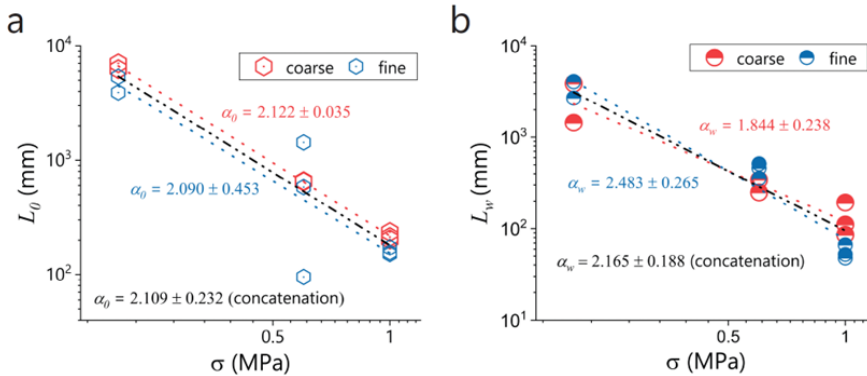


Fig. 3 (a)  $\sigma - L_0$  curve, and (b)  $\sigma - L_w$  curve.

結果から分かるように、 $L_0$ ,  $L_h$  はともに法線応力の 2 乗に逆比例した。また、初期の粒子サイズにほとんど依存しなかった。

また、 $\delta = 2$  m のすべり変位の後取り出した試験片における X 線 CT 断層画像を Fig. 4 に示した。

法線応力が小さい ( $\sigma = 0.2$  MPa) ときは、摩擦によって微細な粒子 (摩耗粉) が生成し、初期に封入した粗粒間の空隙を埋めていく様子が観察された。一方、法線応力が大きい ( $\sigma = 1.0$  MPa) ときには、摩耗粉がさらに微細化しており、さらに興味深いことに、ほぼ平坦なすべり面 (図中の黒い線) が生成した。これらの 2 条件は、それぞれ摩擦初期の平坦領域、後期の摩擦減少領域に位置しており、二つの異なる状態 (前半: 粗粒同士の摩擦, 後半: 摩耗粉同士の摩擦) における粉体層の挙動を観察したものと考えられる。

#### 4. 理論

最後に、実験結果を説明するため、摩耗に関する Holm 理論<sup>1)</sup>を拡張した理論を構築した。ここでは、結果のみを示す。まず、摩擦初期の平坦域のすべり変位  $L_0$  は、以下の式で表される。

$$L_0 = \frac{h_0 \phi (1 - \phi)}{C} \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{-2}, \quad (2)$$

ここで、 $h_0$  は粉体層の初期厚み、 $C$  は無次元の摩耗係数、 $\phi$  は初期の粉体層の体積分率、 $\sigma_Y$  は岩塩の降伏応力である。また、減少の特徴的変位  $L_w$  は

$$L_w = 2(m - 1)L_0 = 2(m - 1) \frac{h_0 \phi (1 - \phi)}{C} \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{-2}. \quad (3)$$

となる。ここで、 $m$  は摩耗粉生成による系の圧力変化に関連した無次元の定数である。このように、二つの特徴的長さは互いに密接に関連 (比例) していることが示された。

#### 5. まとめ

本研究では、岩塩粒子の摩擦実験の際に、摩耗によって摩擦の様子が変化し、摩擦挙動に大きく影響することが明らかになった。講演においては、実験結果および理論について詳しく議論を行う予定である。

#### 文献

- 1) R. Holm, Electric Contacts: Theory and Application. Berlin: Springer-Verlag (1946).
- 2) C. Chang, H. Noda, Y. Hamada, G. Wang, C. Huang, T. Yamaguchi, Normal-stress-dependent Frictional Weakening and Microstructure in Sheared Granular Medium of Halite, submitted.

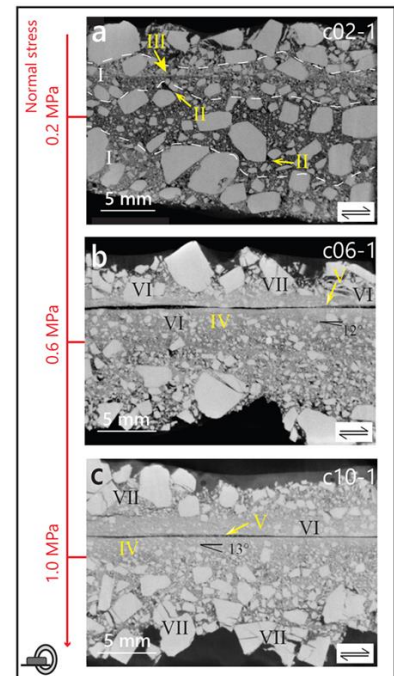


Fig. 4 X-ray CT images for  $\sigma =$  (a) 0.2 MPa, (b) 0.6 MPa, and (c) 1.0 MPa after  $\delta = 2$  m sliding.