

## 超音速すべり摩擦

山口 哲生 〈東京大学大学院農学生命科学研究科 yamaguchi-tetsuo@g.ecc.u-tokyo.ac.jp〉

家敷 拓弥 〈九州大学大学院工学府 takuyaysk@yahoo.co.jp〉

森田 健敬 〈九州大学大学院工学研究院 morita.takehiro.871@m.kyushu-u.ac.jp〉

澤江 義則 〈九州大学大学院工学研究院 sawae.yoshinori.134@m.kyushu-u.ac.jp〉

すべり摩擦は、二つの物体が互いに接触し、すべることによって生じる力学現象である。我々の生活のほぼすべてに関係しているといっても過言ではないくらい、身のまわりのさまざまなところに現れる。ダヴィンチ (L. da Vinci) 以降、500年以上にわたって膨大な量の実験結果が蓄積され、エンジニアリングでの活用がなされてきた。

すべり摩擦に関する学問分野は、トライボロジーと呼ばれる。トライボロジーでは、機械システムにおける金属間の摩擦や摩耗、潤滑に関する研究を中心に、さまざまな取り組みが行われている。また、物理学や高分子科学、地球科学などにおいても、金属、セラミクス、炭素材料、プラスチック、岩石などの幅広い物質群に対して、摩擦の素過程から定常的挙動、過渡的ふるまいに至るまで、実験、理論、数値解析を用いた研究が進められている。とりわけ、摩擦係数のすべり速度依存性は、多くの物質において、古典的な摩擦法則であるクーロン-アモントン (Coulomb-Amontons) 則からの逸脱が明らかになってきた。素過程を色濃く反映し、かつシステムのダイナミクスを左右する重要な特性であるため、近年、多くの研究が行われている。

しかしながら、我々が知る限り、すべての実験はすべり速度が小さい低速条件でのみ行われており、高速条件における理解が不足していた。ここで、低速、高速とは、一体何に対してであろうか？ 今回着目するのは、摩擦が起こる材料 (固体) の**弾性波速度**である。空気中の音波 (縦波) とは異なり、固体には、S波 (横波)、P波 (縦波)、レイリー (Rayleigh) 波 (表面波) など複数の弾性波が存在し、それぞれが異なる伝播速度をもつ。それらよりも速くすべ

らせる“**超音速**”では、こういった現象が見られるのであろうか？

しかしながら、超音速条件におけるすべり摩擦の実験は、典型的な摩擦材料である金属では容易ではない。なぜなら、金属の弾性波速度は、その中で最も小さなレイリー波速度ですら 10 km/s 程度と極めて大きく、同程度あるいはそれ以上のすべり速度を実現するのが困難であるからである。それでは、一体どうすれば超音速すべり摩擦を実行できるのか？ そこで登場するのが、ソフトマターの一つであり、金属のそれと比べて圧倒的に小さな弾性波速度をもつ**ゲル**である。

本研究では、弾性波速度のうちレイリー波速度とS波速度が小さく、かつ壊れにくいシリコーンゲル (以下ゲル) を用いることで、“音速の壁”を突破することに成功した。そのうえで、摩擦係数のすべり速度依存性を調べたところ、S波速度を超えるとともに摩擦係数が急激に上昇することが分かった。また、ゲル表面の変形形状や内部応力分布が、S波速度以上で質的に変化した。さらに、動弾性理論をもとに定常状態における解析解の導出を試みたところ、摩擦を採り入れた形で解析解を求めることができ、その解析解によって実験結果をある程度説明することができた。

思い付きで始めた研究であったが、超音速すべり摩擦という新しい分野を切り拓くことができた。しかしながら、慣性の効果を考慮した弾性流体潤滑理論の構築や、境界による弾性波の反射を採り入れた解析、定常状態の安定性に関する議論など、実験結果を説明するための理論的アプローチがまだまだ不足している。現象の解明を目指した、さらなる研究が必要である。

### 用語解説

#### 弾性波速度：

等方的でかつ均一な弾性体の弾性波には、物体内部を伝わるS波、P波と、物体表面を伝わるレイリー波が存在し、それぞれが決まった伝播速度 ( $V_S, V_P, V_R$ ) をもつ。一般には、 $V_R < V_S < V_P$  となる。

#### 超音速：

一般には、「媒質中を運動する物体と媒質との相対速度が、その媒質の音速を超えること」を意味するが、ここでは、「すべり摩擦において、すべり速度が二つの物体のいずれかのレイリー波速度を超えること」とする。より正確には、本研究のようにやわらかいゲルとそれに比べて圧倒的に弾性率の大きな金属との摩擦において、すべり速度の領域はゲルの3つの弾性波速度を用いて subRayleigh ( $V < V_R$ )、superRayleigh-subsonic ( $V_R \leq V < V_S$ )、interersonic ( $V_S \leq V < V_P$ )、supersonic ( $V_P \leq V$ ) と分類され、“超音速”は後者の3つを指す。

#### ゲル：

三次元網目構造をもつ高分子と溶媒の混合物である。一般に、他の固体と比べてやわらかく (せん断弾性率が  $10^2 \sim 10^6$  Pa 程度、金属のそれよりも  $5 \sim 8$  桁小さい)、弾性波速度は極めて小さい。

