薄い板の接触と滑りのメカニズム

発表概要

身の回りを注意深く見渡すと、我々の生活には棒状や面状のものがあふれています。例えば、髪の毛や植物のつる、紙、パスタ、ケーブルといったものがわかりやすい例です。こういった細長い物体が触れ合ったときにとりうる形を予測し、制御することは、基本的な力学の問題になるだけでなく、工業的にも重要なテーマです。すなわち、細長い物体が接触する基本的な問題を考えることは、新たな製品開発や複雑な現象の理解に繋がります。

立命館大学総合科学技術研究機構プロジェクト研究員の佐野友彦 学術振興会特別研究員(PD)らの研究グループ[注1]は、薄く真っ直ぐな板を床に鉛直に押し付けるという、一見すると単純ですが実は複雑な問題を紐解くことで、板がどのように床の上で変形し滑るのかを解き明かしました。その結果、棒状の物体と面状の物体が触れ合う際の基本的な性質を明らかにすることに成功しました。今回の研究成果は、棒状または面状のものを構成要素とする、新たな工業デザインや複雑な現象の解明の足場になることが期待されます。

発表のポイント

・　薄い板(リボン)を床に対して垂直に押し付けた際に、リボンが変形し滑る(図1)仕組みを理論と実験を組み合わせて初めて明らかにした。

・　硬いリボンから柔らかいリボンまで網羅的に数値シミュレーションを行う事により、硬い棒を記述するエラスチカの問題と、柔らかいロープを床に落とした際にとぐろを巻くコイリング現象を統一的に理解できる事を示した。

・　リボン状の物体が床や面と接触する現象は日常生活だけでなく、自然現象や工学製品など普遍的に存在するため、関連する工業製品のデザインや複雑な生物現象の理解といった応用が期待できる。

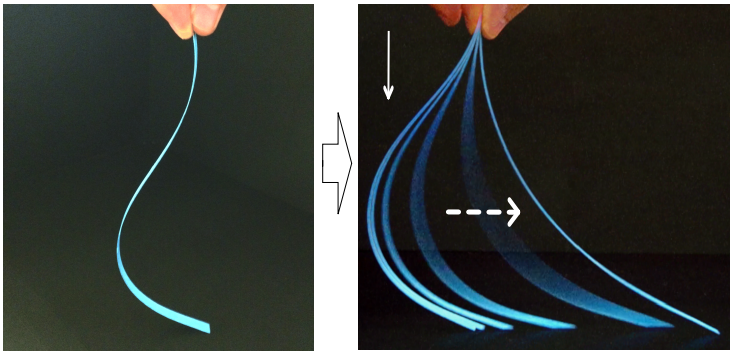

図1. 左: 薄く真っすぐな板を床に押し付けた際の形状. 右: 滑る際のストロボ写真.

発表内容

自然の複雑な構造や運動のなかには、細長い物体の相互作用によって生み出されるものがあります。例えば植物のつるが近くの棒に巻付いたり、物を避けるように根や茎が成長したりする現象は、細い物体が棒状または面状のものと接触した結果起きるものです。朝起きて髪をブラシする、歯を磨く、ハチミツをトーストの上に垂らす、靴ひもを結ぶといったように、自然現象だけでなく我々の身の回りにもあります。また、工業的にも非常に重要で、例えばケーブルを巻きとるリールや、ポリマーブラシやヤモリの足先にヒントを得た生体規範粘着テープなどが応用例として挙げられます。以上述べてきた細く薄い物体が何かと力を及ぼし合う結果どのような形をとるのか。これを理解するには物体の弾性[注2]と接触面での摩擦が相互作用する現象の考察が必要です。このような基礎科学的な研究は、棒や繊維状の物体からなる新たな工業製品の開発にとって有益であると同時に、複雑な生物現象を理解する助けにもなり得ます。

立命館大学総合科学技術研究機構の佐野友彦 学振特別研究員(PD)らの研究グループ[注1]は、薄い物体と面(基板の表面)が相互作用する現象を考える上で最も基本的な問題として、図1に示したモデル系を調べました。薄く真っ直ぐな板(弾性リボン)を床に対して垂直に押し付けると、図1左側の写真のように左右どちらかに飛び出し座屈[注2]した形になり、そして更に押し込むと右側の写真のように滑ります。この現象は、棒や板を手にした人であれば誰でも経験のある現象ではないでしょうか。一見すると単純な現象に見えますが、そうではありません。例えばどの程度押し込めば滑るのか、どのように滑るのか、リボン先端の滑り長が何で決まるかといった疑問に答える事はじつは簡単ではありません。こういった基本的な問いに答える為には、リボンの弾性、幾何学、床との摩擦や重力の間の複雑な絡み合いを1つ1つ紐解く必要があるからです。

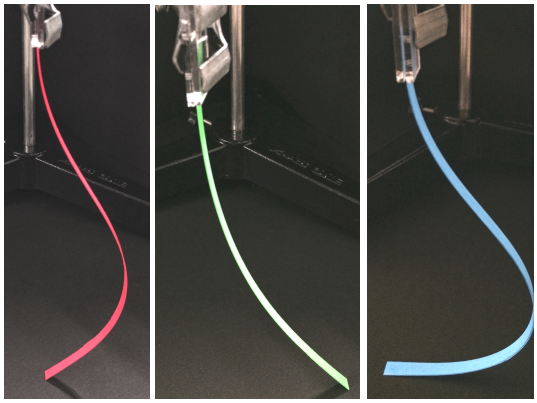

図2. 左から順に “ピン留め状態 (P state),” “完全滑り状態 (CS state),” “部分滑り状態 (PS state)” を表す。

そこで本研究グループは、まず自重によってあまり曲がることがない“固い”リボンを考え(例えば薄い金属板のようなもの)、リボンが面とどのように相互作用するか調べました。まず彼らはリボンを押し込む数値シミュレーションを行う事で、リボンは床との摩擦と押し込み長の大きさに依存して、 下端が押し込む前から滑っていない「ピン留め状態(P state)」、下端が滑ってしまった「完全滑り状態(CS state)」、 下端が滑っているが

リボンに変曲点があるため完全には滑っていない「部分滑り状態(PS state)」の3つに分類できる事を見いだしました(図2)。更に、どの程度の摩擦と押し込み長でそれぞれの状態になりうるかを、弾性理論の厳密解(エラスチカ)[注2]と実験によって示しました。床の摩擦が大きく押し込み長が小さい場合にピン留め状態、摩擦が小さい場合に完全滑り状態、摩擦も押し込み長も大きい場合に部分滑り状態が現れるということを理論的に明らかにしました。

３つの状態がそれぞれいつ実現されるのかという問題はリボンや棒が床に対して突っ立った際にいつ不安定になるのかを探す問題と読み替える事ができます。ピン留めから完全滑りに移行する際、リボンは大変形を起こしてしまいます。リボンや棒の様な細い構造物からなる物体にとっては、このように安定性を失った滑りを伴う大変形は物体の破損につながるため実用上望ましくありません。一方でピン留めから部分滑りに移行する場合は、押し込むにつれてより安定性が増します。これはリボンが下端の「点」ではなく、「側面」で床と接するためです。完全に滑ってしまうのか部分的に滑るだけで済むのかを決める指針は、細い構造物からなるものをデザインする際にその安定性・安全性を決める上で重要なガイドラインとなると考えられます。

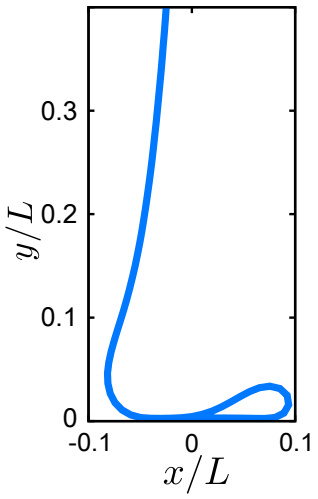

図3. 数値シミュレーションによって再現した平面状のコイリング形状. (リボンの全長を*L*としている)

次に本研究グループは、上で明らかにした“固い”リボンが床に留まったり滑ったりする仕組みが“柔らかい”リボンではどうなるのかを数値シミュレーションによって明らかにしました。ここでいう“柔らかい”とは自重で容易に変形してしまう事を意味します。例えば、紙のリボンや茹でたフェットチーネ(平たく薄いパスタ)のようなものに相当します。リボンが受ける重力と曲げ弾性力が同程度の場合、ピン留め状態の下側が自重で垂れ下がる事で床と側面で接触します。そして重力が曲げ弾性力を大きく上回る場合には図3のように折り畳まれた構造が見られます。ちょうどロープを床に垂らした際にみられるコイリングと呼ばれる現象の平面版に相当するものを数値シミュレーションで見いだしました。柔らかいリボンまたは棒を床に垂らせば容易に側面で接します。側面での接触はリボンや棒を滑りにくくさせますから、それらを垂らすと垂らした箇所に溜まり続けることになるためにとぐろを巻き、コイリング現象が起きます。リボンの重力に対する柔らかさを定量的に考察することによって、硬い棒やリボンを記述する理論とコイリング現象を統一的に理解できる事を示しました。

研究の意義、今後の展望

薄い板を床に対して垂直に押し付ける。一見単純ですが実はこの現象には弾性、幾何学、摩擦、さらには重力が複雑に絡み合っています。これらを一つずつ紐解くことにより、細く薄い物体の弾性と摩擦が競合する複雑な現象の、基礎的な側面を明らかにすることに成功しました。本研究で明らかにした事は、例えば植物の根や茎の成長やヤモリの足の表面の摩擦の仕組みといった自然界にある様々な大きさの生物現象の理解や、それらにインスパイアされた生体規範材料の開発の指針につながります。これらを実行に移すには、今回取り扱った真っ直ぐな板に対して、くせ(自発曲率)や捻りの効果を取り入れたり、床との表面化学的な相互作用を考える必要があります。今後は本研究グループが明らかにした一般的な性質を足場にして、細い物体同士が複雑に絡み合う現象の理解の発展や新たな工業デザインに貢献していきたいと考えています。

論文タイトルと著者

タイトル: Slip Morphology of Elastic Strips on Frictional Rigid Substrates

著者: Tomohiko G. Sano, Tetsuo Yamaguchi, Hirofumi Wada

雑誌名: 米国物理学会誌 Physical Review Letters (2017年4月28日号)

URL: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.118.178001
DOI: 10.1103/physrevlett.118.178001

発表内容の連絡先

立命館大学総合科学技術研究機構 学振特別研究員(PD) 佐野友彦

電話番号: 077-561-5847

Mail: tomohiko@gst.ritsumei.ac.jp

注1. 立命館大学 総合科学技術研究機構の佐野友彦(学振特別研究員PD)、九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 , 九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 水素適合材料研究部門の山口哲生准教授、立命館大学 理工学部 物理科学科の和田浩史教授からなる研究グループ。

注2. 力を加えると変形するが、その力を除くともとの形に戻る性質をもつものを弾性体と呼ぶ。その性質を弾性と呼び、弾性体を記述する理論的な枠組を弾性理論という。細いリボンを長軸方向に圧縮すると、ある圧縮力を越えた際にリボンは面外変形を起こす。こういった面外変形を座屈と呼び、その変形の様子は弾性理論で記述される。特に座屈した棒やリボンを記述する理論をエラスチカ理論、座屈した形のことをエラスチカ曲線と呼ぶ。