

柔らかいひもの巻き付きのしくみを解明 —ひもはどのように他の物体に巻き付くのか？—

概要

私たちの身の回りには、朝顔の蔓や、ガーデニングの水撒き用のホース、糸やロープ、スパゲッティなど、ひも状の物体が多くあります。これらのひもは、別の物体の周りに巻き付いていることも多くあります。しかし、自重で垂れ下がったひもを別の物体の周りに巻き取るという現象において、巻き付いたひもの形態やその形成メカニズムは、これまでわかっていませんでした。京都大学大学院理学研究科の谷茉莉助教（元東京都立大学大学院理学研究科助教）、立命館大学理工工学部の和田浩史教授らの研究グループは、この問題に対して、弾性体（注1）のひもを用いたモデル実験と数値シミュレーション、弾性理論を組み合わせる研究を行い、ひもが棒に巻きつく際の巻き付き形状と間隔が、ひもの硬さ・太さ・長さ、巻き付かれる棒の太さに依存することを明らかにしました。得られた結果は、幾何形状の変化を伴う弾性体の基本的な問題の理解を促進するのみならず、材料力学や、ロボットのソフトアームの開発などの応用にも繋がるのが期待されます。本研究成果は、2024年2月2日にアメリカ物理学会が刊行する国際学術誌「*Physical Review Letters*」に Editors' suggestion としてオンライン掲載されました。

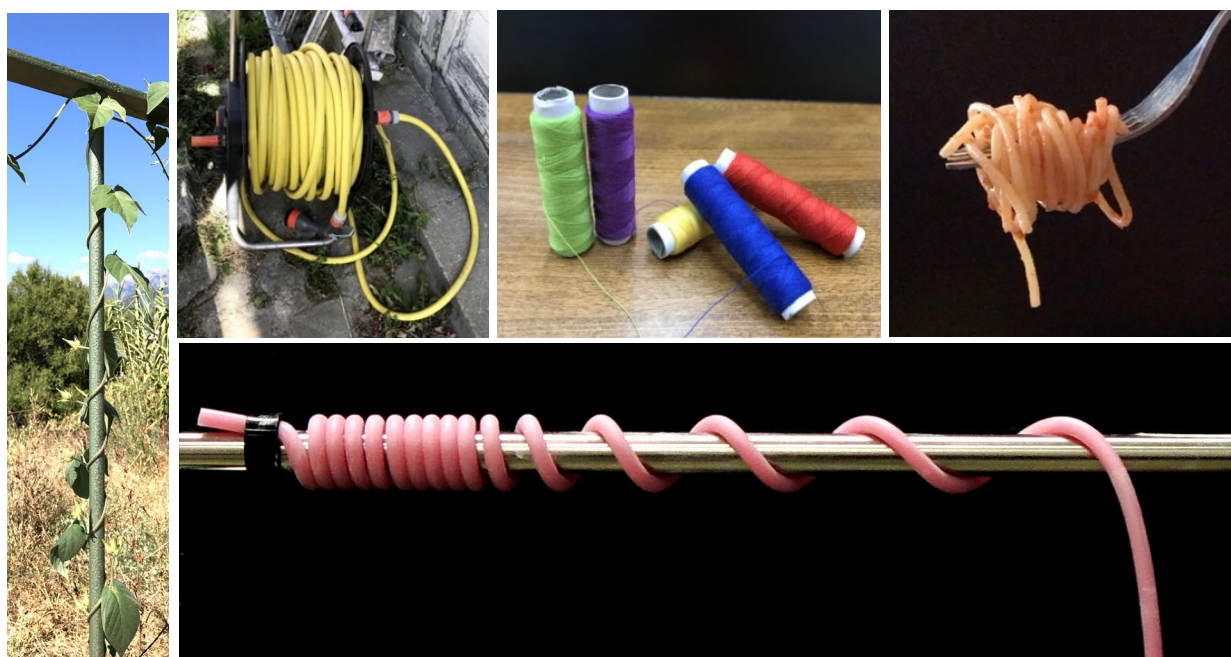


図1：私たちの身の回りにみられる巻き付き形状（朝顔の蔓、ガーデニング用の水撒きホース、糸、スパゲッティ）と、実験で得られた巻き付き形状（写真の撮影はいずれも谷茉莉）。

1. 背景

細長いひも状の物体は、私たちの身の回りの様々な場面で見ることができます。そのサイズスケールは、例えば DNA などの小さなものから、ひも、ロープなどの大きなものまで幅広く、また、その種類も、植物の蔓や蛇などの生物から、糸などの人工物、麺などの食品まで、非常に多岐に渡ります。これらに共通した「ひも」の性質として、同じ素材で作られたブロック状の物体に比べて曲げ変形（注2）が起こりやすく、しなやかに変形することが挙げられます。物体の形状や構造と力に関する研究の歴史は古いものの、弾性体と幾何形状の変化が絡み合う問題に関しては、その複雑さゆえに理解が進んでいないことが多くありました。これらの問題は、近年、構造物の設計や、様々な形状の物体を掴むことが可能なロボットアームの開発などの応用的可能性の広がりから、改めて注目されている分野となっています。

一方、私たちは日常生活において、糸や水撒き用のホースを別の物体に巻き付けて欠陥や絡みを防ぎながら収納したり、スパゲッティをフォークに巻き付けて食べたりするなど、細長い物体を別の物体に巻きつけることが多くあります。大抵の場合、私たちは経験的に最適な巻き付け方を把握していますが、巻き付ける物体の形状によって、時には、巻き付けるのが難しい場合や、綺麗に巻きつかない場合もあります。特に、外力をかけずに、ひもの自重のみがかかっている状況での巻き付きに対して、巻き付きの可否が何によっているのか、巻き付きの間隔はどのように決まるのかといった点は、これまで理解されていませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究グループは、硬さや太さが異なる弾性体の均一なひもを作成しました。このひもの一端を、水平に置かれた円柱に固定すると、ひもは重力で下に垂れ下がります。この状態で円柱をゆっくりと回すと、ひもは徐々に円柱に巻き付いていくことがわかりました（図2）。また、ひもが隙間なく密に巻き付く場合と、らせん状に巻き付く場合、さらには、巻き付かない場合があることがわかりました（図3(a)）。さらに、これらの巻き付きパターンが共存する場合があることもわかりました（図3(a3)）。これらの現象は、ひもと円柱の摩擦とひもの排除堆積効果を考慮に入れたモデルの計算機シミュレーションによっても再現することができました（図3(b)）。

さらに、確認された3つの巻き付きパターン（密な巻き付き、らせん状の巻き付き、巻き付きなし）は、ひもが円柱からぶら下がっている長さや、ひもの硬さや太さ・重さを反映した重力曲げ長さ（注3）、円柱の太さによることを明らかにし、これらの量を用いて、パターンの状態図を作ることに成功しました（図4）。また、パターンの境界を弾性理論から説明することができました。さらに、巻き付きの間隔を理論的に説明することに成功しました。

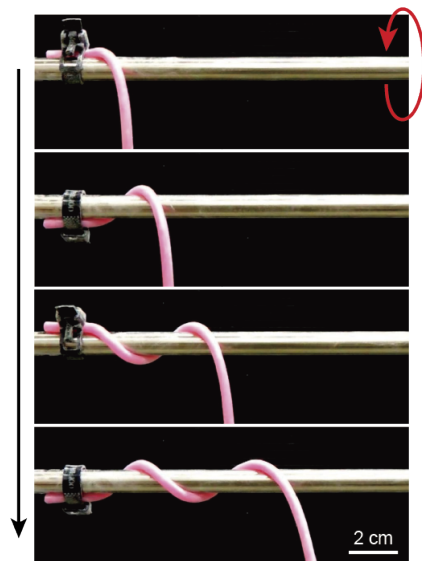
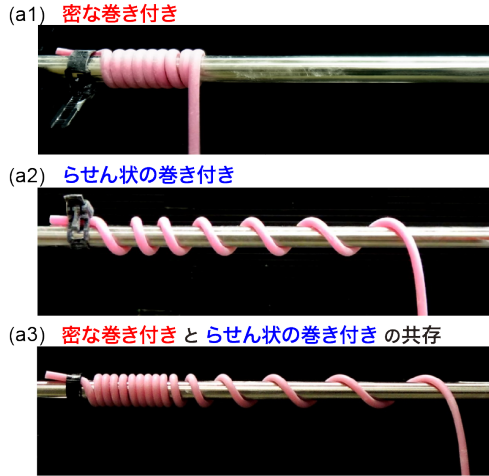


図2：モデル実験。弾性ひもの一端を円柱に固定し、円柱をゆっくりと回すことで、ひもを巻き取る。

(a) 実験で得られる巻き付きパターン



(b) シミュレーションで得られる巻き付きパターンの摩擦係数依存

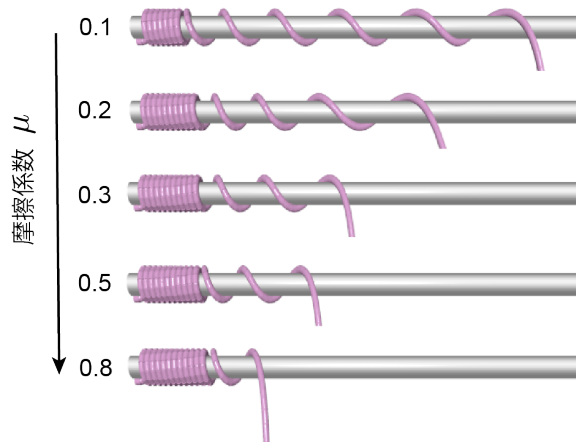


図3：(a) 実験で得られる巻き付きパターンと(b) シミュレーションで得られる巻き付きパターンの摩擦係数依存性。

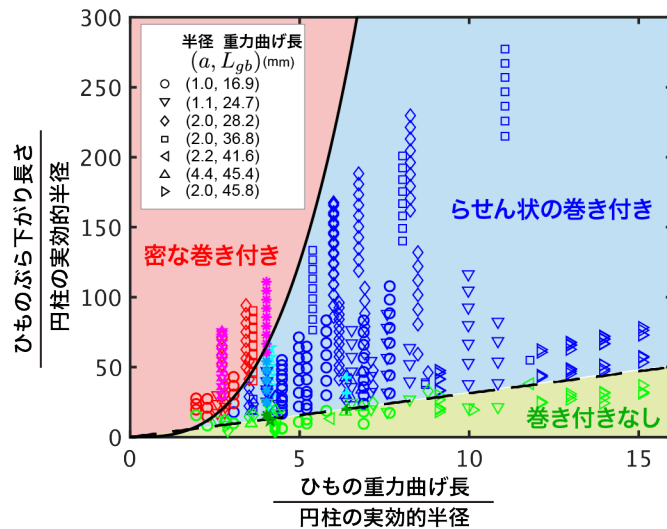


図4：実験で得られた巻き付きパターンの状態図。得られる巻き付きパターンは、ひものぶら下がり長さと円柱の実効的半径の比、および、ひもの重力曲げ長さと円柱の実効的半径の比によることがわかった。

3. 波及効果、今後の予定

今回は、自重でぶら下がっている均一なひもを別の物体で巻き取る問題に対して、物理実験、数値シミュレーション、解析的理論を総合的に組み合わせて、巻き付きの形状とその形成メカニズムを明らかにしました。非常に単純なモデル実験に思われますが、弾性力学の理論を用いて全体を理解するには、摩擦や、その都度変わる接触領域の理解など、難しい点が多くあることもわかりました。これらの問題は、今後、より単純でより制御された状況で調べる必要があると考えています。近年、しなやかに変形する弾性体の幾何形状の変化を弾性力学で理解したり、ソフトロボティクス（注4）などに応用しようとしたりする研究が盛んに行われてきており、今回の成果は、これらの分野へも波及効果があると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の一部は、学術振興会科学研究費補助金(若手研究No. 20K14431 および学術変革研究(B)No. 22H05067、基盤研究 (B) No. 22H01192) の支援を受けて行われました。

<用語解説>

(注1) 弾性体：力をかけると変形するが、力をなくすと元に戻る性質（弾性）を持つ物体の総称。例えば、バネやゴムなど。

(注2) 曲げ変形：弾性体に起きる変形には、伸縮変形、曲げ変形、ねじれ変形、の3種類がある。ブロックのような厚みのある物体に比べて、薄膜やひもは曲げ変形、ねじれ変形が起こりやすい。

(注3) 重力曲げ長さ：弾性体のひもに対して、重力と曲げの効果が同程度になる特徴的な長さのこと。弾性ひもの硬さ、太さ、密度、重力加速度により決まる。この長さよりもひもが長い場合、重力の影響でひもは曲がるようになる。

(注4) ソフトロボティクス：柔らかいアームなどを持つソフトロボットを扱うロボット工学のこと。

<研究者のコメント>

「ひもは他の物体にどのように巻き付くのか」という一見簡単そうな問いですが、きちんと理解しようと思うと、弾性、幾何、重力、摩擦が関係した複雑な問題でした。一方で、最終的に得られた結果はシンプルであるため、基礎的・応用的な研究発展、産業への波及が期待できます。また、自身の手元でひもを弄って試すことが可能なので、色々な方々にこのような問題を身近に感じていただけるきっかけとなれば嬉しいです。(谷茉莉)

<論文タイトルと著者>

タイトル：How a Soft Rod Wraps around a Rotating Cylinder

(日本語訳：柔らかいひもは回転円筒にどのように巻き付くのか)

著者：Marie Tani and Hirofumi Wada

掲載誌：*Physical Review Letters*

DOI：10.1103/PhysRevLett.132.058204