

## 超流動ヘリウムの懸垂液滴が示す新たな運動様式の発見

～水などの通常液体では起こりえない未知の振動モード～

### ポイント

- ・超流動ヘリウムの懸垂液滴が示す未知の運動様式を 2 種類発見。
- ・壁面を覆っている超流動ヘリウムの薄膜が下地となり、抵抗のない液滴運動が発現。
- ・液滴の振動というありふれた現象でも、超流動性が関わると振る舞いが一変。

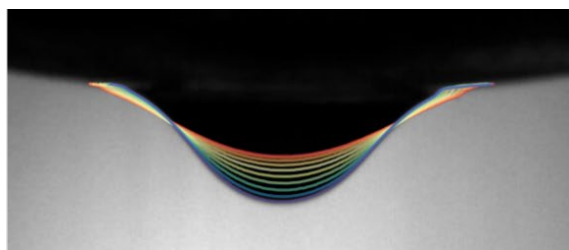
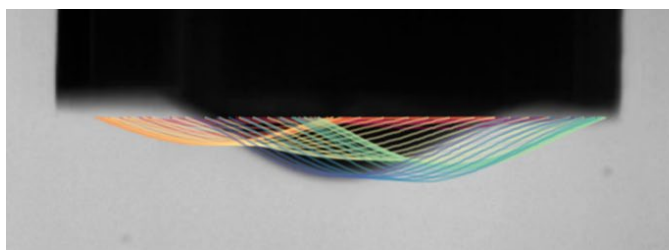
### 概要

北海道大学大学院工学研究院の野村竜司教授らの研究グループは、平らな壁面の下にぶら下がった超流動ヘリウムの液滴（風呂の天井に生じる水滴と同様のもので、懸垂液滴と呼ばれる）を調べ、これまでに知られていない 2 種類の運動様式を発見しました。超流動とは液体ヘリウムを絶対零度近くまで冷却してできる粘性のない状態で、壁の表面に厚さが数十ナノメートルの薄い膜を作ることが知られています。この膜ができているお陰で、超流動ヘリウム液滴が壁面に沿って自由に動けることが発見のカギでした。水滴のような通常液体の場合、壁の小さな凸凹や汚れに引っかかって動かないことを目にすると思いますが、超流動ヘリウム液滴は何の抵抗もなく動くことができたのです。

一つ目の運動は平らな壁面に沿って超流動ヘリウムの懸垂液滴が水平運動し、平面の端に到達すると反射して往復運動するというものです。ボールが 2 枚の壁の間で衝突を繰り返し、往復するかのような運動です。このような水平運動は理論的にはネーターモードとして予測されていたものの、現実には存在しないとされてきましたが、超流動ヘリウムで実現したのです。

二つ目の運動は懸垂液滴の上下振動です。これまでに水などでは大きな液滴ほどゆっくり振動すると知られていたのですが、この常識に反し、液滴の大きさに依らず振動周期が一定である異常な振動をしました。詳しく見てみると、液滴の最下点が上下方向へ振動すると同時に、液滴の縁が壁面に沿って水平方向に大きく振動しており、この縁の水平運動が異常性の原因と分かりました。液滴の縁が自由に動ける超流動ヘリウムでのみ実現する新たな振動モードと言えます。

なお、本研究成果は、2024 年 11 月 19 日（火）公開の Physical Review Letters 誌（オンライン版）に掲載されました。



超流動ヘリウムの懸垂液滴が示すネーターモード（左図）と異常振動モード（右図）。

液滴の運動を表すため、輪郭線の時間変化を重ね書きしてある。

## 【背景】

液体ヘリウムを絶対零度近くまで冷却してできる超流動ヘリウムは、全く粘性がなくサラサラと流れる特殊な液体状態です。超流動とは、本来ミクロな世界を記述する枠組みである量子力学が、温度を下げるによりマクロな世界まで拡大して現れた現象で、一見常識に反するとも思える不思議な振る舞いを見せます。例えば、どんな狭い隙間でも素早く流れる、一度流れ出すと止まらず永久に流れ続ける、壁があると数十ナノメートルの薄い膜を作って全壁面を覆いつくす、カップに汲むと壁面を覆った薄膜を伝って自然と溢れ出す、などです。これら現象は水などの粘性がある通常液体では起こりえず、粘性のない超流動ヘリウムに固有の現象です。

では、超流動ヘリウムの液滴は、通常液体の水滴などと異なる振る舞いをするのでしょうか？本研究では、平らな壁面の下にぶら下がった超流動ヘリウムの液滴の運動を調べました。このような液滴は懸垂液滴と呼ばれ、風呂の天井についた水滴と同様のものです。上述の壁面を覆った超流動薄膜の影響で、超流動ヘリウムの懸垂液滴は全く抵抗を受けずに壁面に沿って自由に動き、水滴ではあり得ない運動をするを見出しました。通常液体の水では壁面の凸凹や付着したゴミなどの影響で、水滴が引っかかって自由には動けないことを目にしたことがあると思います。しかし、超流動ヘリウムでは壁面を覆った薄膜が下地となることで凸凹などの影響を排除するため、液滴の自由な運動が可能となりました（図 1）。このことから、これまでに知られていない液滴の運動様式が 2 種類発見されました。

## 【研究手法】

実験はガラスデュワーと呼ばれる断熱性のガラス容器中で、超流動ヘリウムを生成することにより行いました。ガラス製であるため、絶対零度近傍の超低温に冷却した実験空間を、外部から直接観測できます。生成した超流動ヘリウムをカップに汲むと、超流動ヘリウムが壁面を覆った超流動薄膜を伝って溢れ出します。この性質を利用して、カップの底面に懸垂液滴を作ることができます（図 2）。この懸垂液滴の運動を、高速度ビデオカメラで撮影することにより調べました。

## 【研究成果】

今回発見された一つ目の運動は、超流動ヘリウムの懸垂液滴の水平運動です。平らなカップ底面にぶら下がった懸垂液滴が、平面に沿って水平運動しました。懸垂液滴が平面の端に到達すると反射して運動方向が反転し、ぶら下がったまま何度か往復運動しました。あたかも 2 枚の壁の間においたボールが、壁と衝突を繰り返して往復運動するかのような振る舞いです。平面の端がボールに対する壁のような役割をして、懸垂液滴が反射したのです。実はこのような平面に沿った液滴の運動は、ネーターモードという名前が付けられていて、過去に理論的には予言されていました。しかしながら水滴などの通常液体は壁に引っかかり自由に動くことはないため、ネーターモードは現実には存在しないと考えられてきました。壁面に沿って自由に動ける理想化した状況でのみ実現する、仮想的な液滴運動と見なされてきたのです。超流動ヘリウムではこの理想的状況が成り立っていたため、仮想的なものでなく実在する運動様式であると証明されたことになります。

二つ目の運動は懸垂液滴の異常な振動です。液滴の最下点が上下方向へ大きく振動すると同時に、液滴の縁もカップ底面に沿って水平方向に振動しました。液滴全体が大きく変形しながら振動したことになります。通常液体では液滴の縁が底面に引っかかるので、縁の位置が固定されたまま上下に振動するのが普通です。例えば水滴の振動を思い浮かべれば、このような縁も含めた液滴全体での振動は起こらないということを納得できると思います。平面に沿って自由に動ける超流動ヘリウムの懸垂液滴でのみ可能な振動様式ということになります。この振動の振動周期を調べたところ、液滴の大き

さに依らず一定値をとることが分かりました。通常液体の液滴では、大きな液滴ほどゆっくり振動するということが分かっています。超流動ヘリウムの懸垂液滴は、この常識に反する異常な振動をしました。今のところ、なぜ周期が大きさに依らないのか理由は分かっていませんが、縁の運動が異常性の原因であることは分かりました。液滴の振動という流体物理学の基礎的、一般的性質の中にも未解明な側面があるということを、超流動ヘリウムの懸垂液滴が顕わにしたと言えるかもしれません。

### 【今後への期待】

壁に付着した液滴の運動は日常生活でもよく見る馴染みのある現象でしょう。蓮の葉の上で転がる水滴やインクジェットプリンターなどにも関わりがあるので、自然現象の解明や工業上の応用にも重要な現象です。現実の水滴の挙動は、壁の凸凹やゴミに中途半端に引っかかり、動いたり止まったりと複雑な運動をするため、理解するのは簡単ではありません。窓ガラスに張り付いた水滴が垂れていくのを思い浮かべればよいでしょう。

壁に沿って自由に運動できる理想化した液滴を考えることは、液滴運動の基本的性質を理解する上で重要な出発点です。中途半端に動くことができる状況よりも問題が単純化されるからです。しかし自由な運動を実現することは難しく、実際の状況で対応するものを見つけるのは容易ではありませんでした。本研究で報告された超流動ヘリウムの懸垂液滴の平面に沿った自由な運動は、この現状を打破できる可能性を示しています。長年仮想的な運動と思われていたネーターモードの存在が検証されたに留まらず、平面の端での反射や、液滴縁の振動を伴う未知の振動モードが発見されました。

超流動ヘリウムを用いれば、これまで仮想的に考えていたにすぎない極限状況を実際に実現できる可能性があります。超流動ヘリウムは、様々な流体现象一般の基礎的性質の検証や、未知現象の探索に恰好の舞台を提供するでしょう。

### 【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 JP17K05535、JP22H01174 の助成を受けたものです。

### 論文情報

|       |                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論文名   | Anomalous Oscillation Modes of Superfluid Pendant Droplets (超流動懸垂液滴の異常振動モード)                                                                                                                                                               |
| 著者名   | 小野寺啓太 <sup>1</sup> (研究当時)、永友隆真 <sup>1</sup> (研究当時)、三宅啓斗 <sup>1</sup> 、山根諒太 <sup>1</sup> 、高松翔太 <sup>1</sup> 、青木悠樹 <sup>2</sup> 、野村竜司 <sup>3</sup> ( <sup>1</sup> 北海道大学大学院工学院、 <sup>2</sup> 群馬大学数理データ科学教育研究センター、 <sup>3</sup> 北海道大学大学院工学研究院) |
| 雑誌名   | Physical Review Letters (米国物理学会誌)                                                                                                                                                                                                          |
| D O I | 10.1103/PhysRevLett.133.216001                                                                                                                                                                                                             |
| 公表日   | 2024 年 11 月 19 日 (火) (オンライン公開)                                                                                                                                                                                                             |

### お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 教授 野村竜司 (のむらりゅうじ)

T E L 011-706-6643 F A X 011-706-6859 メール nomuraryuji@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://sites.google.com/elms.hokudai.ac.jp/lowtempphyslab>

### 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】



図 1. 壁を覆った超流動ヘリウムの薄膜が微小な凸凹の影響を取り除き、懸垂液滴の自由な運動を可能にした。

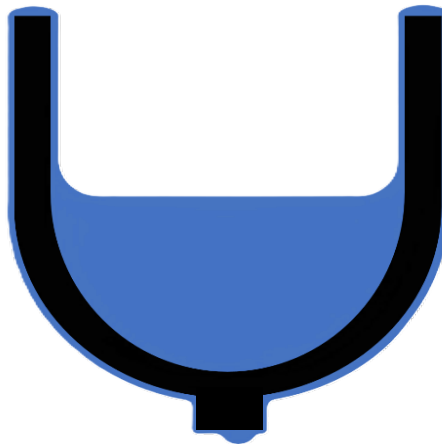


図 2. カップから薄膜を通して溢れ出る超流動ヘリウムにより生じる懸垂液滴。