

## 超流動ヘリウム中でヘリウム結晶を動かす

極低温において存在する超流動ヘリウム中で、基板をずれ振動させ、その基板上に作成したヘリウム結晶を水平方向へ駆動することに成功した。この駆動方法はいわゆる尺取虫駆動法の一で、摩擦を利用して通常物質を駆動するのに使われてきたが、観測されたヘリウム結晶の運動は通常物質の運動と大きく異なるものであった。ヘリウム結晶は、振動を開始した直後は変形をするのみで移動せず、この変形が完了した後に初めて大きく移動した。この振る舞いは、高速で超流動体から結晶成長する、ヘリウム結晶の量子性が関わった新しいタイプの駆動様式の可能性がある。

極低温で存在する液体ヘリウム4を、更に絶対温度2 K以下へ冷却すると、量子効果により粘性の無い超流動状態へと相転移する。超流動ヘリウムの中で、良く制御して遠隔操作で物体を大きく動かすことは容易ではない。超流動ヘリウムは粘性が無いため、どんなに小さな穴があっても漏れ出すため、ピストンや歯車といった素朴な駆動機構の導入は難しいからである。また、そのような駆動機構を働かせた際に発生する熱は、極低温においては冷却の邪魔となり、温度を上げてしまう。通常は物体を動かすのでさえ、極低温においては容易ではない。では超流動ヘリウム中で、ヘリウムの結晶を動かすことはできるであろうか。

超流動ヘリウムを25気圧以上に加圧すると、ヘリウムは六方最密構造の結晶となる。超流動体から生成する非常にクリーンな系であり、粘性や不純物などの結晶成長を遅くする要因が無いため、ヘリウム結晶の成長速度は著しく速いことが知られている。例えば、1 m/s程度の高速で結晶を成長させることは容易である。速い結晶成長は、結晶が微小な刺激で大きく変形することも意味し、通常物質ではありえない特異な現象を生み出す源泉ともなってきた。例えば、成長と融解を繰り返して結晶表面を伝わる、結晶化波と呼ばれる特異な表面波が存在する。結晶表面に超音波を照射すると、超音波の圧力振動に追従して高速で成長と融解が起こり、超音波が完全反射される。また、結晶中を非散逸の質量流が流れる、超固体性も大きな話題となっている。このような特異な性質は量子効果に起因するので、ヘリウム結晶は量子結晶とも呼ばれる。超流動ヘリウム中でヘリウム結晶を制御して駆動することができるようになれば、通常物質では粘性や散逸によって覆い隠されていた新現象が、ヘリウム量子結晶の運動において発現することも期待される。

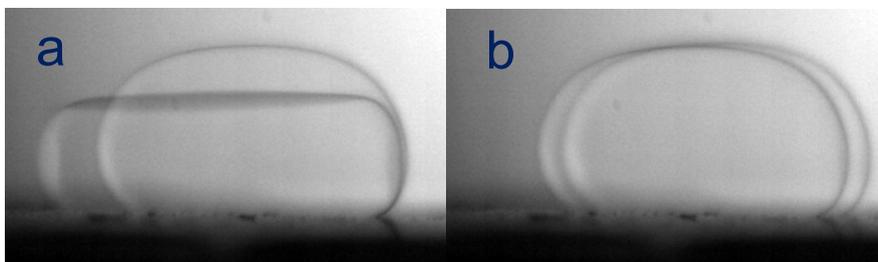


図1. 超流動ヘリウム中に配した振動基板上のヘリウム結晶の変形と駆動。a; 変形前の平らな結晶と、振動による変形後の丸みを帯びた結晶を重ねて表示した写真。平らな面はラフニング転移温度以下で現れるc面で、cファセットと呼ばれる。b; 変形後に右方向へ移動する結晶を、時刻をずらして重ねて表示した写真。

最近、東京工業大学のグループは、超流動ヘリウム中に水平に配した基板上で、ヘリウム結晶を水平方向に駆動することに成功した。圧電素子により、基板を左右へ非対称なずれ振動させることにより、基板上のヘリウム結晶を水平に動かした。非対称振動による駆動は、動摩擦と静摩擦の差を利用した、いわゆる尺取虫駆動法の一つで、物体を動かす手法として広く用いられている。この手法で、粘性の無い超流動体中でもヘリウム結晶を駆動できることが示された。ただし、観測されたヘリウム結晶の運動は、通常物質の運動と大きく異なるものであった。ヘリウム結晶の運動と超流動体からの高速結晶成長が絡み合った、量子結晶に特有の奇妙な運動様式が観測された。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2017 年 7 月号に掲載された。

図 1 は、温度 0.3 K において、1 秒間に 100 回の非対称振動を基板に与えたときの、超流動液体中の単一のヘリウム結晶の変形と駆動の様子である。基板は右方向へはゆっくりと 0.7  $\mu\text{m}$  微小変位し、左方向へは素早く戻るといふ、非対称振動を 100 回繰り返した。最初の 0.6 秒間では、結晶は動かさず変形したのみであった。図 1a は、時刻 0 秒と 0.6 秒の結晶の写真を重ねたものである。最初は横長であった結晶（横幅 3.6 mm、高さ 1.1 mm）が、0.6 秒には丸みを帯びた形（横幅 3.0 mm、高さ 1.7 mm）に変形していることが見える。結晶表面の左側は右方向に移動しているが、右側は移動しておらず、変形のみが起こっている。この変形の後に、初めて結晶は動き出した。図 1b は、時刻 0.6 秒と 1.0 秒の結晶の写真を重ねたものであり、結晶の駆動を表す。変形後に、その形を保ったまま、270  $\mu\text{m}$  の距離を右方向へ移動したのが分かる。この移動距離は、振動振幅からの見積もりよりも一桁大きかった。右方向へ基板が変位したときに結晶表面近傍で誘起される超流動流により、結晶の右側で結晶が成長し、左側で融解することにより、結晶が見かけ上、大きな距離を移動したように見えるという機構を著者らは提案した。一方で尺取虫駆動法は、基板が左方向へ素早く戻るときに、基板上の物体が滑ることを前提にするものである。ヘリウム結晶の滑りがどのようなものかという点を含めて、運動の全体像が明らかになったとは言えず、それらの統一的理解はこれからの課題となっている。

基板振動による変形、変形後のみに起こる運動とその大きな移動距離は、いずれも通常の尺取虫駆動法では見られないものであり、成長と融解が高速で起こる量子結晶に特有の運動様式が観測された可能性が高い。また超流動ヘリウム中でヘリウム結晶の駆動が実現できたことは、ヘリウム結晶と基板の滑りや、二つのヘリウム結晶間の究極の清浄表面における摩擦力測定への道を開くものである。物体間の摩擦や磨耗を調べる分野はトライボロジーと呼ばれ工学的にも重要であるが、これまでその研究対象としてきたのは量子効果が効かない通常物質が主であった。超流動体からの高速の成長、巨視的量子トンネル効果や超固体性などの、量子性が顕著に現れるヘリウム結晶の摩擦研究が可能となれば、量子トライボロジーとも言える研究への展開が期待される。

## 原論文

[Inchworm Driving of  \$^4\text{He}\$  Crystals in Superfluid](#)

[Taichi Yoshida, Akira Tachiki, Ryuji Nomura, and Yuichi Okuda: J. Phys. Soc. Jpn. 86 \(2017\) 074603](#)

問合せ先：野村竜司（東京工業大学理学院）