

平成 25 年 1 月 10 日

東京工業大学広報センター長  
大谷 清

## 無重力環境で固体ヘリウム本来の形を観察

－固体物理の基礎研究へ新しい道開く－

### 【要点】

- 固体ヘリウムを粉砕し結晶の成長、消滅過程を解明
- 小型ジェット機によるパラボリック飛行（20 秒間の無重力）で実験
- 重力で隠されていた真の固体の形と結晶成長を発見



### 【概要】

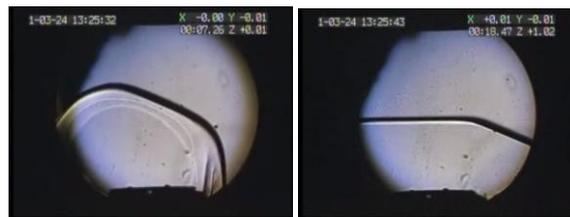
東京工業大学理工学研究科の奥田雄一教授らは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の協力により、固体ヘリウムの結晶形や結晶成長の様子を無重力で観察し、重力で潰されていた固体ヘリウム本来の姿を初めて見ることに成功した。また固体ヘリウムを粉砕すると、小さい結晶は消失し、一番大きい結晶がますます大きくなる現象を発見した。これらは固体物理の基礎研究を進展させる成果といえる。

小型ジェット機のパラボリック飛行（用語 1）によって 20 秒間の無重力状態を作り出し、機上で 0.5K（絶対温度、0 K = -273.15 度 C）の極低温を生成する技術を開発して実験した。固体ヘリウムの結晶成長は、数秒間という驚くべき短時間で起こるので、このような無重力実験が可能なのである。実験は遠州灘沖の特別空域で実施した。

これらの成果は米国物理学会の「フィジカル・レビュー（Physical Review）」と英国物理学会の「ニュー・ジャーナル・オブ・フィジクス（New journal of physics）」に掲載された。

## ●研究成果

今回の実験では二つの研究成果を得た。第1は無重力環境で固体の形がどのように変化するかを突き止めた成果である。0.5K という極低温で固体ヘリウムを生成したところ、液体のように水平な界面と斜めに傾いた面で囲まれた結晶が容器の1/3くらいにできた(下図右)。この状態で無重力にすると、水平だった面が丸みを帯びながら縮んでいき、斜めの面の部分は溶けていく(下図左)。結晶がこのように変形するための駆動力は結晶の表面張力である。



微小重力下において実現した固体4Heの平衡形(左図)。  
右図は地上での形である。

重力が地上の値に戻ると、結晶はまた元の形に戻る。こうして、固体ヘリウムは地上では重力によりその形を大きく変形されていたことが分かった。本当の結晶の形は無重力状態で初めて分かるということが大きな発見である。この結果は「フィジカル・レビュー」に掲載された。

第2は、結晶の形ではなく、オストワルド熟成という結晶種の成長・消滅の振る舞いに関する成果である。オストワルド熟成は、容器の中で小さな結晶が多数生成した際に、時間の経過とともに小さい結晶が消えてなくなり、その代わりに大きい結晶がますます大きくなる現象。この現象を発見したドイツの物理化学者のヴィルヘルム・オストワルド(Wilhelm Ostwald)の名をとってこのように呼ばれている。オストワルド熟成の駆動力は界面エネルギー(表面張力と同じもの)で、小さく膨らませた風船と大きく膨らませた風船をチューブでつないだときに、小さいほど表面のゴムが空気に与える力が強いいため、小さい風船から大きな風船に空気が流れていくのと似ている。

しかし、通常オストワルド熟成は、何日もかかってゆっくり進む現象で、しかも顕微鏡下でしか観察できない。ところが微小重力下にある極低温の固体ヘリウムを超音波で粉碎してその時間発展を観察したところ、数秒間という短時間で10mmもの大きな結晶に成長することが世界で初めて明らかになった。この結果は「ニュー・ジャーナル・オブ・フィジクス」の2012年12月号に掲載された。

なお、これらの研究はJAXA宇宙科学研究所の宇宙環境利用科学委員会研究班ワーキンググループの活動として位置付けられている。



パラボリック飛行で微小重力になった瞬間に、超音波パルスにより固体ヘリウムを粉砕し、その後の時間発展を写真でとらえたもの。左から右まで 3 秒程度である。この間にオストワルド熟成が起こっていることがよく分かる。円形の窓のサイズは 24mm である。

## ●背景

物質を十分低い温度まで冷やすと、普通は固体になるが、なかには絶対零度(0K)まで冷やしても液体のままの物質がある。その代表例が液体ヘリウムだ。ヘリウムを 1 気圧で 4K 以下に冷却すると液化し、この液体を 2K 以下まで冷却すると、粘性のない超流動状態(用語 2)に転移する。この超流動ヘリウムに 25 気圧以上の圧力をかけると、ようやく固体ヘリウムが超流動相から生成する。

この固体ヘリウムはとても不思議な結晶である。その結晶成長の速さは温度の低下とともにどんどん速くなり、0.5K 以下の温度では数秒間という驚くべき速さで結晶ができる。しかし、地上では重力により容易に変形する(歪むのではなく結晶の形を変える)ため、真の結晶の形をとらえることはできなかった。

ところが微小重力状態ならば固体ヘリウムの結晶の真の形を知ることができる。これはそれ自体が興味深いだけでなく、固体の形の基底状態(用語 3)を考える上でも重要な情報を提供してくれる。というのも、温度が 0K に近づくにしがって、水晶や塩の結晶が示すような原子レベルで平らな結晶面が巨視的なサイズで出現することが理論的に指摘されているものの、どの温度でどれくらいの結晶面が出てくるのか、あるいは最後まで出てこない面はあるのかなど、理論的にも不明なことがたくさんあるからだ。

## ●研究の経緯

奥田教授らは、このようなことに動機づけられて、ジェット機による微小重力実験を始めた。ジェット機を急上昇後、急降下させることで、約 20 秒間だけ無重力状態を作ることができる。軌道の形からパラボリック飛行と呼ばれている。JAXA の協力を得てこの実験を実施した。MU300 という小型ジェット機に実験装置を搭載し、0.5K まで冷却された固体ヘリウムがどんな振る舞いをするかをビデオに収めることに成功した。0.5K という極低温をジェット機の中で生成することは、容易に想像されるように実験的に多くの困難があったが、数年間の苦勞の末ようやく実験にこぎつけることができた。

## ●今後の展開

この成果を、国際宇宙ステーションでの実験へ発展させるという考え方もあるが、奥田教授らは今回の実験の成功で、航空機実験も基礎物理の研究に有用であることが示されたとしている。現状では MU300 という小型ジェット機で実験しているが、その制約を乗り越えようと努力して、さらに新しい技術が展開されることもあるとし、今後も航空機実験の路線で新しい展開を目指していく。奥田教授らは今後、いっそうの低温での実験に挑戦する計画だ。

希釈冷凍機というもう少し複雑で、さらに低温を生成することができる冷凍機を航空機用に改良し、0.1K 以下の実験を目指す。今回の実験は、そのための第一歩と位置付けている。温度や圧力に精密にコントロールし、より精密な測定をして、本当の結晶の形はどのようなかという基礎問題にさらに迫っていく考え。また、固体ヘリウムは壁を間違いなく濡らす。これは、無重力でも必ず壁にくっつくことを意味している。本当に壁の影響をなくするにはどうすればよいか、など新しい問題にも進んでいく計画である。

### 【用語説明】

1. パラボリック飛行 上空 4000m から 9000m に向けて急上昇し、その後すぐに急降下へ移行することで、軌道の頂点あたりで微小重力を約 20 秒間ほど作りだすことができる。軌道が放物線（パラボラ）のようになっているのでこの名前がついている。
2. 超流動状態 液体ヘリウムの温度を 2 K 以下に下げると、粘性の全く存在しない液体に変化する。光も通さないような小さな穴も超流動状態の液体は流れていく。ある種の金属で電気抵抗がゼロになる超伝導という現象が知られているが、それも類似の状態である。
3. 基底状態 絶対零度にしたときの系の状態を基底状態と呼ぶ。物理では対象の基底状態がどういう状態であるかを大事に考えている。有限温度になっていくと、温度による擾乱により、その基底状態がどのように崩され別の状態が実現していくかという考え方で物事をとらえる。

### 【問い合わせ先】

東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻教授 奥田雄一

Email: okuda@ap.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2458

FAX: 03-5734-2751