

微小重力下の超流動ヘリウム沸騰実験

高田 卓

超流動ヘリウムという液体に関する研究についてご紹介します。最近ではヒッグス粒子の発見で話題になった LHC (Large Hadron Collider) という加速器や、X線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) に使用されていた液体です。核融合研究においても TORE SUPRA という実験装置で使用されていました。非常に低い温度の液体で興味深い性質にあふれています。

酸素や窒素など全ての気体は、温度を下げると液体になり、更に温度を下げると固体になります。(例えば水は摂氏 0 度で氷になり、摂氏 100 度で沸騰すると習ったかと思います。) しかしヘリウムは特別です。ヘリウムが液体になるのは、大気圧下で摂氏マイナス 269 度です。(ちなみに、ドライアイスが摂氏マイナス 79 度、いぼの除去手術などで使われる液体窒素が摂氏マイナス 196 度ですから、日常的に接する機会のないほど低い温度です。) そして他とは違って、絶対零度 (摂氏マイナス 273.15 度) 近くまで温度を下げてても非常に高い圧力をかけない限り固体にならず液体のままです。絶対零度とはそれよりも温度の下がらない温度です。更に変わっているのは、液体ヘリウムはある温度を境に突然性質が変わってしまうことです。およそ摂氏マイナス 271 度よりも温度を低くすると、他の液体では考えられない性質を数々見せるように変化します。この現象を超流動現象、その時の液体ヘリウムを超流動ヘリウムと呼びます。(図 1 に相図)

超流動ヘリウムは、摩擦無しでどんな小さな隙間も自在に行きわたり、気泡も無くどこもかしこも均一な温度になってしまうという性質をもっています。小さな隙間も通り抜けるのでコルクで蓋をしても流れ出てしまいます。こうした性質は、強い磁場を得るために使う超伝導磁石の冷却にもってこいです。他の液体ではどうしても入り込めない隙間があったり、温度にムラができてしまった

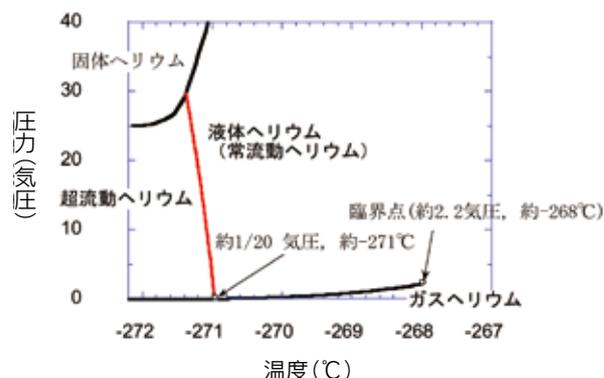


図1 ヘリウム4*の相図 (温度、圧力によってどのような状態に変化するかを示した図)

*本文中全てヘリウム4の話のみを記載しています。

りするのですが、超流動ヘリウムではそうした問題が起こりません。そのため、超伝導磁石を冷却するいくつかのプランのうちの最も優れた方法の一つとして研究されています。

ただ、気をつけなければならないこともあります。過去、超流動ヘリウム中では沸騰は起きないと理解されていた時代もあったほど沸騰しにくい液体ですが、強い発熱があれば沸騰が起きてしまい、冷却性能もグンと悪くなってしまいます。そのため、どんな場合に沸騰が起きてしまうのか、沸騰が起きたらどうなるのかについて知る必要があり、我々は研究を進めています。

超流動ヘリウム中の沸騰は、沸騰を引き起こす発熱部がどれだけ深く沈んでいるかによって、沸騰のしやすさも沸騰している時の様子も変わってきます。海などで深く潜ると体に水圧がかかるのと同じで、軽い液体である超流動ヘリウムに沈めたものでも僅かな圧力がかかります。この僅かな圧力の正体は超流動ヘリウム自身の重さですから、重力をゼロに近づけることができれば、この僅かな圧力の沸騰に対する効果、地上の重力の下では隠れてしまう物理を明らかにすることができると期待されます。こうした理由から我々は無重力状態での実験をしました。

無重力状態を得るために自由落下塔を使いました。物を落下させて着地するまでの僅かな時間だけ得られる無重力状態を使って実験をしようという施設です。我々のグループでは産業総合技術研究所北海道センターにある約 1.3 秒間の無重力状態を得られる落下塔を利用して研究を続けてきました。研究の進展に伴ってさらなる長時間の無重力を得るため、ブレーメン大学 ZARM（宇宙応用技術及び微小重力センター）にある約 4.7 秒間の無重力状態が得られる落下塔を使用しました。図 2 の写真は ZARM の落下塔の外観で、144m の高い塔は街でも有名な建物の 1 つです。落下塔は方式によって多少の差はありますが、地上で我々が感じている 1 万分の 1 以下の重力を得ることができ、大まかに言って宇宙ステーション上と同じくらいの小さな重力です。



図2 ブレーメン大学ZARMにおける落下塔の外観。この塔内を丸ごと真空にした中に実験カプセルを落下させて実験する。

図 3 は ZARM における実験結果の一例です。約 $15 \times 15\text{mm}$ の範囲を撮影したもので、約 2mm の長さの細線ヒータに電流を流し、その発熱によって出現した気泡を捉えています。気泡がきれいな球形となっている様子が見て取れます。これは微小重力中ならでの写真です。浮力の影響がないの

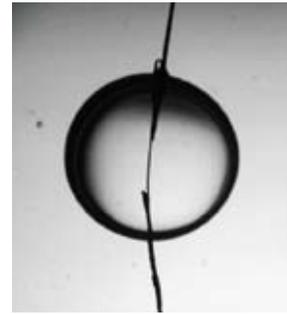


図3 落下中に引き起こした沸騰の様子。気泡のサイズが5mm程度の綺麗な球形となっている。中央に見える細い線が直径50ミクロン、長さ約2mmのヒータ。

で、気泡が上昇したり楕円に変形したりしません。また地上では、超流動ヘリウム中の沸騰は泡とは呼べないほど薄い膜のような気泡しか作らないのですが、微小重力下では比較的大きな気泡を作ります。そのため、気泡の成長、収縮の過程をつぶさに観察することが可能になります。この過程を捉えることで、沸騰の性質を決める気泡表面の熱伝達の問題について物理的な理解を深めることができます。こうした研究によって、これまでの沸騰研究の未検証問題や経験的に決められてきた相関係数などの奥にある物理が明らかにされることが期待されています。

本稿でご紹介した研究は、高エネルギー加速器研究機構、筑波大学、産業総合技術研究所、ヴラツロフ工科大学の研究者、ZARM のスタッフの方々並びにその他にも多くの方々に協力いただいて進めてきました。また、日本学術振興会、宇宙航空研究開発機構宇宙工学委員会、European Space Agency の援助を受けて研究を進めています。

(装置工学・応用物理研究系 助教)