

固体 4He の結晶成長の新展開と航空機実験

東工大 奥田雄一、野村竜司

The new aspect of 4He crystal growth and an experiment on the jet plane

Yuichi Okuda and Ryuji Nomura

Tokyo Institute of Technology, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551

E-Mail: okuda@ap.titech.ac.jp

Abstract: Since solid 4He is grown from the supersfluid, its growth rate becomes enormously high in the low temperatures. So the equilibrium crystal shape becomes very sensitive to the gravity in the low temperatures. The true shape can be obtained only under the microgravity. The physics, such as the roughening transition, should be studied under the microgravity. The present study is the ground-based research aimed at the experiment in the space. As the first step, we are planning to the experiment on the jet plane.

Key words; Solid 4He, Crystal Growth, Superfluid, Facet, Roughening transition, Micro-gravity

固体ヘリウムは、極低温において超流動体から圧力をかけて生成される。極低温では他の如何なる不純物も固化して系から出て行くために、固体ヘリウムは極めて高純度な物質になる。固体ヘリウムの結晶成長を考えると、その成長を妨げるものは、超流動中の素励起だけであり、それは温度の低下とともに、急激に減少する。従って極低温の固体ヘリウムは、極めて速い結晶成長を示す量子性の強い興味深い結晶である[1]。

固体 4He におけるラフニング転移

巨視的な固体 4He の基底状態はどのような形であろうか。固体は、温度が下がるに従ってラフニング転移を次々に示して行き、原子レベルで平面（ファセット）が出現して、最終的にはファセットで覆われるというのが古典的な結晶形の描像である。ラフニング転移は Kosterlitz-Thouless 転移と数学的に等価である。その転移点は次式で与えられる。

$$k_B T_R = \frac{2}{\pi} \gamma a^2$$

γ はその面のスティフネス・コンスタント、 a はその面の面間距離である。スティフネス・コンスタントはその面を変形したときの復元力の強さを決めるものである。この式は結晶の詳細にはよらないユニバーサルな形をしている。

量子性の強い固体 4He についてもラフニング転移の研究はなされており、2mK までの測定により 3 つの相転移が見つかっている[1]。それらのうち、c-ファセットについてはよく調べられ、2 次元 xy モデルの対称性をもつ相転移であることが検証さ

れている。しかし、他の 2 つのラフニング転移のうち、平衡状態で観測されたのは 1 つだけで、もう一つは、成長形の形からかるうじて見出されたものである。これはこの式から推定されることと大きくかけ離れており、量子性の影響を含め、解決されていない問題である。

これまでの固体 4He のラフニング転移研究では、地上の重力の影響については一切考慮されてこなかった。実際、固体 4He は巨視的なサイズの結晶になると、重力の影響を強く受けて形を変形させている[2]。無限に広い容器に収めると重力下ではキャピラリー長（～1mm）の厚さの扁平な形に変形してしまう。結晶成長係数が極端に大きいので重力ポテンシャルを極小にするように結晶が変形してしまうのである。重力が長波長の揺らぎを抑える働きがあるため、重力によりラフニング転移の singularity がつぶされることが理論で指摘されている[3]。重力下では、ラフニング転移は厳密な意味ではなくなる。固体 4He の平衡形を微小重力下で観測する意義はここにある。微小重力下、極低温において固体 4He の平衡形がどうなるかという問題は、極めて重要である。

宇宙冷凍機の開発

固体 4He の微小重力下での実験を実現する上でまず克服しなければならないのが 100mK の極低温を微小重力下で実現する方法である。固体 4He の地上での実験では、3He/4He 希釈冷凍機を用いるが、この希釈冷凍機は 3He/4He 混合液の相分離を重力によって制御しており、また、分溜器には気相と液相が共存しているので、宇宙での使用は不可である。

一方、歴史的には古く、希釈冷凍機が開発される以前に 0.3K 以下の超低温を得るために使用されていた常磁性塩の断熱消磁の方法も、希釈冷凍機のカウンターパートとして宇宙冷凍機として開発が進められてきている。こちらは、本質的に重力と無関係な冷凍原理を持つため有力視されていたが、決定的な欠陥は連続運転が出来ないことにある。希釈冷凍機の卓越した冷凍能力と連続運転できるという特性には太刀打ちできない。

最近、NASA を中心としたチームが、人工衛星に搭載する赤外線センサーの超低温への冷却の必要から、連続的に低温が得られる多段の連続断熱消磁冷凍機の開発に成功した。実際のロケットや人工衛星への搭載を経て、その有効性が実証されている[4]。そのアイデアは、2~3 段の断熱消磁を直列につなぎ、各ステージの消磁・磁化のタイミングを巧みに調整することにより、最低温度を連続的に 60mK に保つものである。コンピュータによるシミュレーションをきめ細かく行い、全体の熱設計を行う。また、高効率の熱スイッチの開発や常磁性塩の熱伝導の改良など、いくつかの要素技術のイノベーションの結果得られた新技術である。

航空機実験での予備実験

航空機実験では、約 20 秒間の微小重力が得られる。固体 4He の結晶成長の速さや系が熱平衡に達する緩和時間が短いことを考えると、この時間は十分である。実験としてまず行うべきことは、平衡形の観測である。できれば c ファセットを容器の底に平行に生成しておき、2g、10mg、1.5g、1g、と 20 秒ごとに連続して変化するときの結晶の形を観測する。さらに、容器壁との接触、濡れの様子、ファセットからの結晶の形の変化を詳細に追うことが、最初に行うべきテーマである。

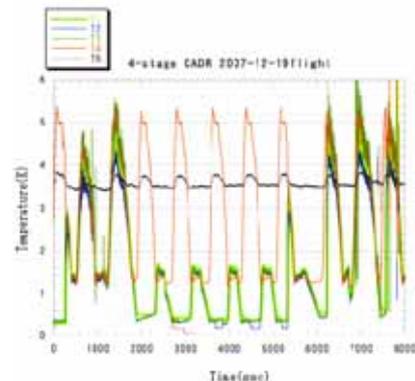
日本宇宙フォーラムの地上研究として、固体 4He の実験を視野に入れた高冷凍能力 (100 mK において $100\ \mu\text{W}$ の冷凍能力) 連続型断熱消磁冷凍機の開発が進んでいる[5]。基本は NASA で開発された連続型断熱消磁装置だが、多段を 4 段にまで拡張し、断熱消磁の常磁性塩の改良を加えることや、消磁サイクルを高速化することなどにより、冷凍能力を飛躍的に上げる工夫がされている。さらに、4 段ステージとして液体 4He 溜めを使用せず、機械式気体冷凍機を導入している。コンプレッサーなど微小重力下での動作に未知の部分もあるが、将来の宇宙冷凍機としての実用を目指したものになっている。

この宇宙冷凍機は予想を上回るスピードで開発が進んでおり、昨年暮れに冷凍機自身を航空機に搭載するテスト飛行が可能となった。

機械式冷凍機など、基本の冷凍機はジェット機中でも予想以上にうまく稼働していることが確認された。ただ、航空機にクライオスタットを積み込む際には電源をオフにしなければならないこと、ハンガーで待機をすとしても 3 時間程度の時間しかとれないこと、滑走路へ移動する途中の振動で熱スイッチが誤動作すること、滑走路自体の平坦度が低く振動が大きいこと、離陸時には大きな g がかかり熱スイッチが誤動作するなど、振動対策が極めて重要であることが改めて痛感された。下の図は、離陸直前からの温度の揺らぎのデータである。断続的に第 1 ステージの温度が急上昇しているのが分かるだろう。

いずれにせよ、冷凍機を航空機に搭載するという前例のない試みは、大きな収穫を得た。この経験を踏まえて、今年の 3 月には固体ヘリウムの実験をジェット機に搭載する計画で準備が進んでいる。本講演では、その準備状況を中心に報告をおこなう予定である。

最後に、本研究は日本宇宙フォーラム公募地上研究および特定領域研究「新量子相の物理」No. 17071004 から援助をいただいたことに謝辞を表します。



参考文献

1. S. Balibar, H. Alles, and A. Ya. Parshin, Rev. Mod. Phys. 77 (2005) 317.
2. Y. Okuda and R. Nomura, J. the Japan Society of Microgravity Application, 21 (2004) 159-164.
3. A. Pimpinelli and J. Villain, Physics of Crystal Growth, Cambridge University Press, 1998.
4. Shirron, P.J., Canavan, E.R., DiPirro, M.J., Tuttle, J.G., and Yeager, C.J., Adv. Cryo. Eng. 45B (2000) 1629-1638.
5. Numazawa, T., Kamiya, Shirron, P., Deipiro, M. and Matsumoto, K., AIP Conference Proceedings (2006), 1579-1580.