

IIII 特集：航空機の放物線飛行による短時間微小重力実験 II IIII  
(原著論文)

航空機 (MU-300) 実験用希釈冷凍機の製作と  
微小重力下の固体  $^4\text{He}$  新現象

高橋 拓也・大内 遙河・野村 竜司  
奥田 雄一

**Construction of a Dilution Refrigerator for Low Temperature Microgravity  
Experiments and Novel Phenomena of Solid  $^4\text{He}$  under Microgravity**

Takuya TAKAHASHI, Haruka OHUCHI, Ryuji NOMURA and  
Yuichi OKUDA

**Abstract**

A compact dilution refrigerator which can be boarded on the jet plane (MU-300) was constructed for the purpose of studying solid  $^4\text{He}$  physics under zero gravity. It was demonstrated that the fridge could cool down to 140 mK on the plane and the lowest temperature was not affected by the parabolic flight. We successfully cooled solid  $^4\text{He}$  down to the same temperature, and were able to perform the observation of the crystal growth of solid  $^4\text{He}$  under zero gravity. The detailed description of the construction is presented and an interesting melting and growth of  $c$ -facet of  $^4\text{He}$  at 140 mK under zero gravity is reported.

**Keyword(s):** Dilution refrigerator, Parabolic flight, Microgravity, Solid  $^4\text{He}$ , Crystal growth, Roughening transition

**1. はじめに**

微小重力下での低温物理を考えるとき、相転移現象はもっとも重要な問題の一つである。その先駆的研究は、NASA およびスタンフォード大の研究者がスペース・シャトル上で液体ヘリウムの 2 次の相転移である超流動転移の臨界現象の研究である<sup>1)</sup>。液体ヘリウムの  $\lambda$  ラインが、圧力の増加とともに低温側にずれているため、地上で実験すると静水圧（液体の高さ）によって転移温度が異なり、比熱の異常の臨界現象を徹底的に調べることが不可能だった。これをスペース・シャトル上で克服する実験が行われた。このように、地上での重力が低温物理現象に決定的な影響を及ぼす次の課題は、固体  $^4\text{He}$  のラフニング転移の問題ではないだろうか。

ラフニング転移とは、温度を下げていくと巨視的な固体の表面において、熱揺らぎにより原子レベルでラフになっていた面が、フラットな面へ転移していく現象である。これは固体の形の基底状態の問題に集約される。ラフニング転移は Kosterlitz-Thouless 転移として知られている 2 次元系固有の相転移と数学的に等価である。強磁性体の相転移が一様な外部磁場によって破壊されるよう

に、ラフニング転移も重力により破壊される可能性が指摘されている。一見、重力が原子的に平坦な面を強制的に作り出すように思われるが、重力は長波長の揺らぎを殺す効果があることは容易に理解される<sup>2)</sup>。

ラフニング転移を古典結晶で研究することは困難である。なぜなら、結晶の平衡形を有限時間内に実現することは一般には不可能であるからだ。水晶や種々の鉱物の美しい結晶形は平衡形ではなく、成長途中でクエンチされたものである。このように古典結晶を使ってラフニング転移の研究をすることは難しい。しかし、量子結晶の中にそれを可能にするものがある。それは固体  $^4\text{He}$  である。極低温における固体  $^4\text{He}$  は、超流動  $^4\text{He}$  に 25 気圧以上の外圧を印加することで生成される。このような特殊な環境で生成される固体  $^4\text{He}$  は、温度を 1K 以下十分に下げるに驚くほどの速さで成長する、言い換えると実験室での時間内に容易に巨視的な系での平衡状態が実現する<sup>3-4)</sup>。

本論文では、固体  $^4\text{He}$  のラフニング転移および平衡形に関する研究を目指して開発した航空機に特化した希釈冷凍機について報告する。後半で本希釈冷凍機を用いて行った航空機実験の成果の一部を紹介する。

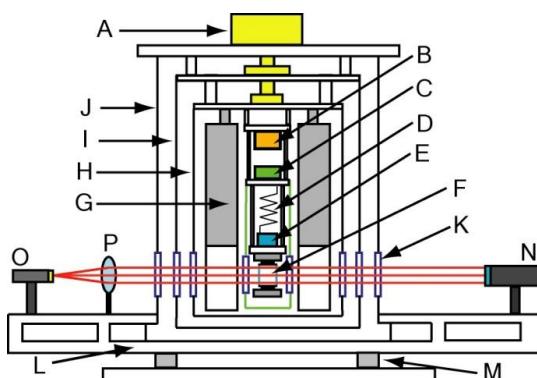
## 2. 航空機実験用希釈冷凍機の製作

### 2.1 微小重力下における希釈冷凍機

宇宙環境での希釈冷凍機の製作については、その重要性が早くから指摘され、いくつかのアイディアが考察されている。希釈冷凍機は、 $^4\text{He}$  に  $^3\text{He}$  が若干溶解した  $^3\text{He}$  希薄相と  $^3\text{He}$  濃厚相との相分離境界面が基本的に重力によって定まることを利用して開発されてきた。また、分溜器 (Still) や 1 K ポットにおける気液界面の安定性も重力に依存している。この従来型の希釈冷凍機を無重力環境で実現するために、電場を利用する<sup>5-6)</sup>、あるいは、多孔質物質によるポーラスプラグを導入する<sup>7-8)</sup>など、新しいアイディアが必要である。しかし、航空機による短時間微小重力という特殊な状況下では、従来型の希釈冷凍機だけで十分に対応できるのではないかという発想のもとに、航空機実験に特化した希釈冷凍機を試作した。その結果、固体ヘリウムの実験を実施するに十分な性能が得られたのでその報告を行う。

### 2.2 航空機実験に特化した希釈冷凍機の製作

我々は、気液共存状態の超流動ヘリウムが 20 秒間の微小重力下でどのように振る舞うかをこれまでの航空機実験で実際に観測している<sup>9-10)</sup>。その知見から 20 秒ほどの時間であれば液体が配管を通して逆流する心配がほとんどないことを知った。さらに、1 K ポットや still と呼ばれる分溜室内の気液界面のある容器の中に多くのメッシュを入れることで、表面積の増大を図ると逆流防止の効果が上がる。混合室内における相分離界面が、この 20 秒ほどの時間内にどの程度乱れるのかについての情報は持っていないが、サンプルセルの温度が急変することはないと楽観して開発に踏み切った。



**Fig. 1** Schematic drawing of the cryostat. A: Motor of GM refrigerator, B: 1K pot, C: Still, D: Tube-in-tube heat exchanger, E: Mixing chamber, F: Sample cell, G: 4K bath, H: 4K thermal shield, I: 80 K thermal shield, J: Vacuum can, K: Optical window, L: Optical bench, M: Vibration absorbing device, N: Camera, O: Light source, P: Lens.

**Figure 1** にクライオスタットの全体図を模式的に示した。クライオスタットの高さは 890 mm、外径は 400 mm であり、この部分の重量は 80 kg である。 $^3\text{He}$  循環用のターボポンプはクライオスタットの側部 (同じラック内) にとりつけてある。除振装置として、航空機用振動吸収部材としてのスプリングをクライオスタット下部に敷きこんでいる。

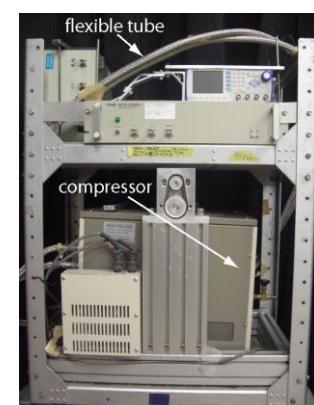
### 2.3 希釈冷凍機の設計の基本方針

希釈冷凍機を製作するにあたり、以下の方針で設計することにした。

- 1) ダイヤモンド・エアー・サービス社の MU-300 への搭載を前提とする。
- 2) 4K-GM 冷凍機\*をベースにする。液体窒素槽は取り付けない。
- 3) 液体ヘリウム槽、1K ポットは用意する。
- 4) 少なくとも 100 mK までの低温を目標とする。
- 5) 光学実験を想定した設計にする。
- 6) 実験装置一式を規定のラック (700W × 450D × 900H) 3 台に収まるように設計する。
- 7) 地上で安定して稼働することも考慮し、希釈冷凍機の基本設計はスタンダードモデルを採用する。
- 8) 機体に搭載して離陸するまでの 4 時間はとても重要で、この間に固体ヘリウムを生成し、100 mK 近傍まで冷却できなければならない。この制約を念頭におく。



**Fig. 2** Cryostat placed in the designated rack.



**Fig. 3** Compressor for 4K-GM refrigerator.

- 9) サンプルセルの体積として 8~10 ミリリットルは必要で, その量の固体  ${}^4\text{He}$  を冷却できる十分な冷凍能力をもつこと.

## 2.4 希釈冷凍機の具体的デザイン

### 2.4.1 4K GM 冷凍機

航空機実験での最大の制約は, 利用できる電力がきわめて限られていることである. MU-300 の場合は, 1 系統 1.5 kW (トータル 2 系統) 以下に抑えることが要請されている. この要請に応えるべく, GM 冷凍機としては, 住友重機械社製の RDK-101D を採用した. 4 K 温度領域での冷凍能力は 0.1 W であり, 現状では電力消費量が最小 (定常状態で 1.3 kW) 機種である. コンプレッサーのサイズも MU-300 の規定のラックのサイズ内に収まる. 市販品でラックに収まるのはこの機種のみである.

4K GM 冷凍機を航空機に搭載する際に気になることは, コンプレッサー本体にあるオイルと約 20 気圧に圧縮されている気体  ${}^4\text{He}$  の混合体のことである. コンプレッサーで圧縮された  ${}^4\text{He}$  ガスとオイルの混合物は, オイルはセパレーターで  ${}^4\text{He}$  ガスとオイルに分離されたのち, コンプレッサー本体へ戻される. 冷凍機の運転中では, コンプレッサー内のこの混合物はオイルと  ${}^4\text{He}$  ガスが混然となった状態であると推測されるので, 微小重力状態に 20 秒間さらされても大きな問題が起こるとは考え難い. 実際, 何回もパラボリック・フライトを経験させているが, コンプレッサーの性能に異常は見られていない. この冷凍機のおかげで, わずか 8 リットルしかない  ${}^4\text{He}$  槽の液体ヘリウムの持続時間が 2 日にも及んでいる. 希釈冷凍機運転中のコールドヘッドの温度は 3.8~4.3 K (@60 Hz) であった.

### 2.4.2 混合室の設計

希釈冷凍機の心臓部は,  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  混合液が  ${}^3\text{He}$  濃厚相と  ${}^3\text{He}$  希薄相とに相分離している混合室と, 一度室温部に取り出してから再凝縮させて循環させる  ${}^3\text{He}$  を効率よく冷却する熱交換器である. 冷凍機の長さ方向にゆとりがある場合は, その設計がしやすいが, 本機のように高さも幅もゆとりがない場合は工夫が必要である. また, 希釈冷却は混合室内のこの相分離界面で進行するので, この界面位置を適切な位置に保持することが重要である. 微小重力により界面の擾乱を小さくするため, 自由空間をできる限り圧縮した設計で, かつ扁平な形状にしてある.

熱交換の重要な要素である焼結銀は, 無酸素銅のドーナツ状のディスクにプレス焼結して製作した. その銅のディスクを混合室の下部の柱に落とし込み, 柱の側面に切られたネジによって抑えつける設計になっている. ボディ全体も無酸素銅で製作されている. Figure 4 に断面図を示している.

自由空間は図面からの計算と体積の実測値ともにおおよそ 20 ml であった. 混合ガスの内訳は,  ${}^4\text{He}$  が 25 リッ

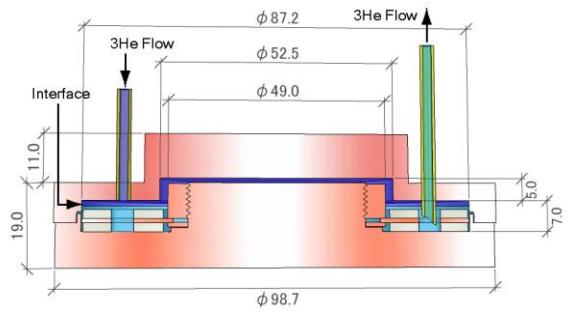


Fig. 4 Cross section of the mixing chamber. Dark blue area denotes the  ${}^3\text{He}$  conc phase and light blue area denotes the  ${}^3\text{He}$  dilute phase.

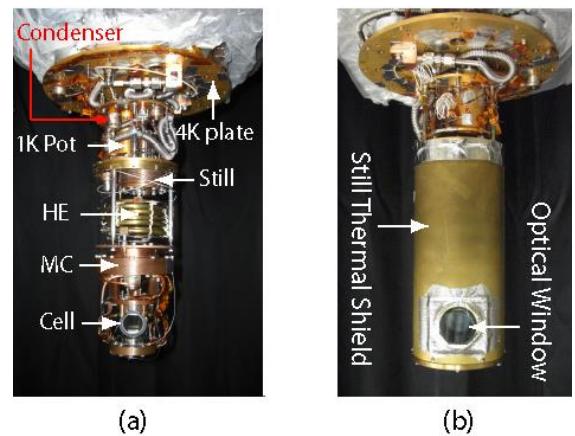


Fig. 5 Picture of the dilution refrigerator unit (a). HE denotes the tube-in-tube heat exchanger. MC is the mixing chamber. (b) A picture of the same unit with thermal shield set at the still stage.

トル,  ${}^3\text{He}$  が 13 リットルであった. 最終的には, 混合室の最低温度が得られるように  ${}^3\text{He}$  のガス量を微調整して最適値を求めた.

### 2.4.3 Tube-in-tube 型熱交換器

Figure 5(a)の写真にあるように熱交換器はスタンダードな tube in tube タイプのものを製作した. 薄肉の真鍮パイプ (外径 5.5mm, 肉厚 0.3 mm, 長さ 1 m,) の中に, コイル状に巻き込んだアーナiled CuNi キャピラリー (外径 1.3 mm, 全長 2 m) を差し込み, 全体を大きくコイル状に成形した. 热交換器全体の体積はおおよそ 20 ml であった.

### 2.4.6 インピーダンスとコンデンサーの製作

インピーダンスは  ${}^3\text{He}$  ガスを循環させる際に, 効率よく 1K 温度で液化させるために不可欠なものである.  ${}^3\text{He}$  循環ラインのインピーダンスは, 内径 0.2 mm の CuNi 管に 0.2 mm のピアノ線を磨いて挿入して作成した. 室温でのインピーダンステストによりその値は  $8 \times 10^{11} \text{ cm}$  であった.

コンデンサーは循環ラインのインピーダンスの手前の1K 温度において、 $^3\text{He}$  ガスを液化するためのものである。100 ミクロンサイズの銅の粉を高圧プレスすることで表面積の大きいコンデンサーとした。室温でのプレスだけで焼結のように結合するように、荒目のやすりで銅の丸棒から粉末を作成し、メッシュでサイズをそろえて銅の容器内にプレスして作成した。

#### 2.4.7 Still (分溜器)

Still は混合液の中から $^3\text{He}$  ガスのみを蒸気圧の差を利用して取り出す部分である。特別な仕様は施さず、従来の希釈冷凍機でのデザインを踏襲した。Figure 6 にその断面図を示す。熱交換器との接続部分に流量を制限するような邪魔板を設けている。航空機用 $^3\text{He}$  蒸発冷凍機の $^3\text{He}$  ポットでは内部に銅のメッシュを多数入れて、微小重力下での $^3\text{He}$  液の逆流防止を図ったが、今回は何も入れずに比較したところ、大きな違いはなかった。

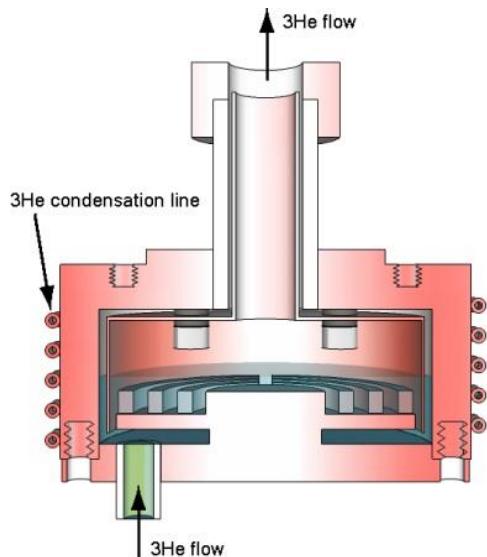


Fig. 6 Cross section of the still. The arrows show the direction of the flow of  $^3\text{He}$  gas.

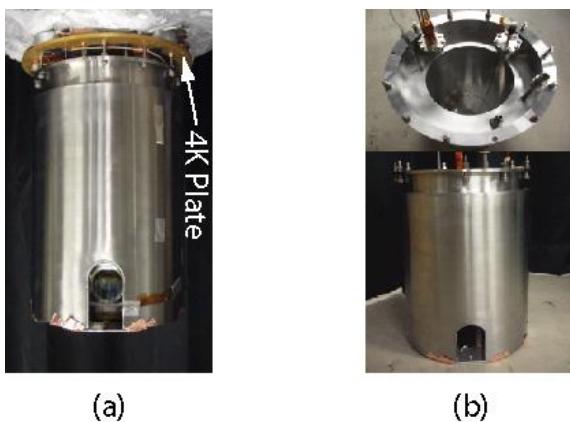


Fig. 7 Pictures of  $^4\text{He}$  bath.

#### 2.4.8 $^4\text{He}$ 槽のデザイン

ダイアモンド・エアー・サービス社の MU-300 の使用に関する規制のため、実験装置一式は実験当日に初めて航空機に搭載が可能となる。搭載にあたりすべての電源は一旦オフし、搭載後エプロンという駐機場へ移動して、そこで改めて航空機から電源が実験装置に供給される。その間 30 分ほど実験装置は電源オフの状態におかれる。そのため、4K 温度のベース温度を GM 冷凍機だけに頼るのは危険である。また、連続運転を想定していたので 1K ポットは不可欠である。その結果、Fig. 7 のような 4K 液体ヘリウム溜めを用意した。外径 216 mm、内径 120 mm、高さ 300 mm のドーナツ状の円筒である。その内容積は約 8 リットル、外側に GM 冷凍機のコールドヘッドに熱アンカーされたシールドが包み込む。その結果、希釈冷凍機を運転中の $^4\text{He}$  槽の液体ヘリウムの持ち時間は 2 日であった。

光学実験が主たる測定手段であるため、光学系の光路を確保するためにこの $^4\text{He}$  溜めに馬蹄形の切欠きが作られている。

#### 2.4.9 ポンプ類

希釈冷凍機を運転するためには、種々のポンプが必要となる。実際に本希釈冷凍機を運転するために使用したポンプ類を Table 1 に、4K-GM 冷凍機のデータとともに示す。Figure 8 はラックに収まっているポンプとタンク類である。



Fig. 8 Tank for  $^3\text{He}/^4\text{He}$  mixture gas and scroll pumps for  $^3\text{He}$  circulation and for 1K pot.

Table 1 希釈冷凍機に使用した冷凍機、ポンプ類

4K GM 冷凍機	0.1 W @4 K (1.3 kVA)	RDK-101D (Sumitomo)
$^3\text{He}$ 循環用 スクロールポンプ	10 m <sup>3</sup> /h	XDS-10 (Edwards)
1 K ポット用 スクロールポンプ	100 ℥/m	SH-110 (Agilent Tech.)
$^3\text{He}$ 循環用 ターボポンプ	200 ℥/s (N <sub>2</sub> ガス)	TG220F (Osaka Vac)

### 3. 希釈冷凍機運転性能

#### 3.1 航空機搭載の手順

MU-300 での実験では、早朝に機体に装置一式を積み込むことになる。その際にはすべての電源をオフにしなければならない。その後ジェット機がエプロンと呼ばれる駐機場まで移動され、そこで初めてジェット機からの電源が投入される。この間 30 分間ほどクライオスタットの温度はゆっくり上昇をするが、 $^4\text{He}$  槽に液体ヘリウムが残っているおかげで GM 冷凍機が急激に 20 K あたりまで上昇しても、それ以上には上昇しない。また、希釈冷凍機の混合室は 150 mK から 600 mK へ、still は 900 mK から 1.3 K へ、1K ポットは 1.5 K から 4.5 K へ上昇しているが、それ以上は上昇しないので問題はない。電源が再投入されるや否や、速やかに温度は下がり出す。以上のこととは 4K 槽に液体ヘリウムが残っている場合のことと、液が無くなると短時間ではもう回復できない。

航空機実験の飛行時間は厳しく定められているので、この駐機場で待機している 3~4 時間がとても重要である。この間に冷凍機全体の温度を十分に下げ、固体ヘリウムを相応しい分量だけ生成する必要がある。順調にいけば、3 時間程度で十分に実験できる態勢にすらすことができた。

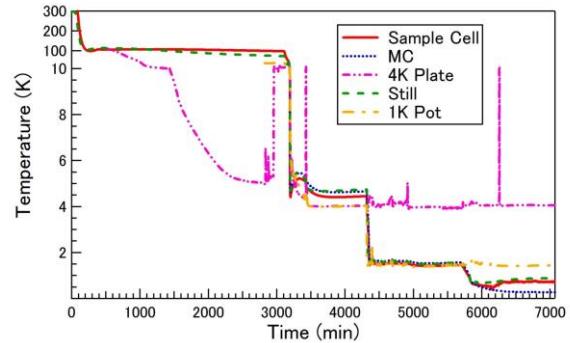
準備を整えて離陸するが、離陸時の加速度の変化は希釈冷凍機の 150 mK 近傍ではほとんど影響を受けない。また、乱気流による擾乱は温度揺らぎを与えるが、気流が安定するとすぐに定常状態に戻る。ジェット機のエンジンからの振動は問題にはなっていない。パラボリック・フライト時における希釈冷凍機の振る舞いについては、次節で述べる。

実験を終了し機体から実験装置を降ろす際は、安全を期す意味で、サンプルセルのヘリウムについては圧力を抜くが、液体はそのままにしておく。また希釈冷凍機の混合液も冷凍機に残したままにしておく。そして、電源をすべてオフにして装置を実験準備室に戻し、そこで電源を回復させて次回のフライト実験に備え冷却を開始する。

#### 3.2 冷却の手順と冷却曲線

本来は GM 冷凍機だけで室温から 4 K まで冷却したいところであるが、冷凍能力が十分でないので実際は寒剤で予冷をする。まず  $^4\text{He}$  槽に液体窒素を入れて全体を約 77 K に冷却する。同時に GM 冷凍機の運転をスタートさせる。この際に、真空槽には  $^4\text{He}$  の交換ガスを少量入れる。多重に巻かれているスーパー・インシュレーションのおかげで室温部との熱交換はあまり起こらないが、全体が窒素温度に達したところで速やかに交換ガスをポンプする。あとは GM 冷凍機のみで温度を下げていく。

**Figure 9** の冷却曲線図において 3000 min 近傍で 4K Plate の温度が 5 K 近傍まで下がってきている。そこまで下がったところで、液体ヘリウムのトランシスファーを開



**Fig. 9** Temperature variation during the first cooling of the dilution refrigerator. 4K plate is thermally anchored to the cold head of the GM refrigerator.

始する。同時に再度交換ガスを導入する。冷却曲線の 3200 min の時刻でまた交換ガスをポンプする。4K Plate の温度がスパイク状に 20K あたりまで上昇している。これは、4K 槽にトランシスファーで液体ヘリウムを 4K 槽に継ぎ足しをしたためであるが、終了後すぐに温度は下がる。

冷却曲線の 4400 min から 5000 min にかけて希釈冷凍機の混合ガスを液化している。5700 min あたりから希釈冷凍機の運転を開始し、MC の温度が下がり出している。約 5 時間で 500 mK、さらに 3 時間ほどで最低温度の 140 mK に到達する。

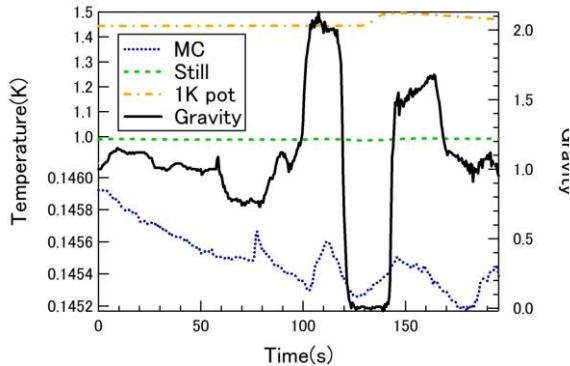
固体ヘリウムを生成する場合は、希釈冷凍機が最低温度に達した後に、MC の温度が上昇しないようにゆっくりとサンプルセルに  $^4\text{He}$  液体をコンデンスし、25 気圧の圧力をかけて固体を生成する。固体の生成については後述する。

#### 3.3 微小重力下における希釈冷凍機

希釈冷凍機の最低温度域でのパラボリック・フライト中の温度変化を、**Fig. 10** に示している。図は混合室 (MC) の温度、Still、1K ポットの温度を重力加速度の変化と併せてプロットしたものである。温度軸は 1.0 K 以上を上半分に 0.1K 刻みで、下半分では 140 mK 近傍で、0.5 mK 刻みでプロットされている。G の変化は右側の軸で示されている。

図から明らかかなように、パラボリック・フライトの実行時で G が  $2.0 \rightarrow 0 \rightarrow 1.5 \rightarrow 1$  と変化しても、それぞれ 20 秒という短時間では混合室の温度はほとんど変化していないことがわかる。さらに極低温ではカピツツア抵抗と呼ばれる熱抵抗が極端に大きくなり、音響インピーダンスの小さい液体（固体）ヘリウムへの熱の出入りは難しくなっている。このような事情もあり、140 mK という極低温で、固体ヘリウムの微小重力実験は従来型の希釈冷凍機で十分に実施することが判明した。

図の上半分の 1K ポット、Still の温度変化を見てみると、こちらもほとんど変化していないが、1K ポットは微



**Fig. 10** Temperature of the mixing chamber during the parabolic flight plotted together with the change of the gravity. The measurement was performed at the coldest temperature around 140 mK.

小重力に入って 10 秒後あたりから明らかに温度上昇が見られ、1G に戻るとゆっくり元の温度に戻っている。しかしながら希釈冷凍機の運転に支障が出るような温度上昇ではない。

Still の温度が 1.0 K というのは少し高いが、これは本希釈冷凍機の 1K ポットと Still との熱的絶縁が不良のためと思われる。それが、希釈冷凍機の最低温度が 140 mK にとどまっている理由になっているかもしれない。この Still の温度もパラボリック・フライトによって影響を受けていない。

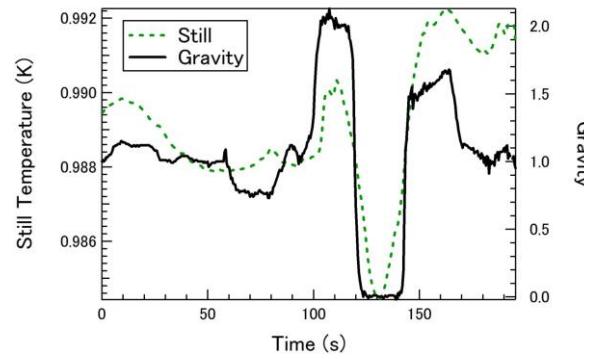
希釈冷凍機はもともと振動に弱いと言われているので、地上では振動を避けるために質量の大きい除振台に載せて振動を回避している。航空機上ではそれは不可なので、振動を吸収するスプリングによりクライオスタットの振動を軽減している。

最後に Still の温度変化についてコメントしておく。Figure 10 にあるように Still の温度もパラボリック・フライトの影響をほとんど受けていないように見えるが、温度スケールを拡大してみると、微妙な温度変化があるが G の変化を明らかに反映したレスポンスが見られた。

Still の温度変化を拡大してプロットしたものが Fig. 11 である。驚くべきことに、Still の温度は G の変化と呼応して変化している。0 G になると温度が下がり、G の増加とともに上昇している。同じ構造を持っている 1K ポットではそのようなことが観測されていないことを考えると不思議である。気になる変化なのでそのような現象が観測された事実のみを記しておく。理由は不明である。

### 3.4 今後の改良課題

140 mK という温度は、全長が短くかつ光学窓を取り付けているために、熱侵入の遮断が十分でなく最低温度がこの温度になっている可能性はある。それだけでなく、希釈冷凍機としてはまだ正常に働いていない部分もあるとも思われる。さらに低温を目指すためには、熱侵入の



**Fig. 11** Temperature variation of the still during the parabolic flight, plotted together with the gravity variation. Notice that the temperature scale is expanded. The variation is pretty small.

軽減の他にいくつか改善が必要である。

$^3\text{He}$  の循環量は  $17 \mu \text{mol/s}$  と設計値からは  $1/5$  以上小さい値になっており、希釈冷凍機本来の性能が出せていない。排気系を含めた循環系に問題があるのかも知れない。また、循環  $^3\text{He}$  ガス系統の圧力バランスを再考すべきかも知れない。循環ラインのインピーダンスを変更したり、分割したりする方法が知られている。この圧力解析が必要である。

Still の温度が 1.0 K と高すぎることが問題である。少なくとも 0.7 K 以下に下げるべきである。1.0 K では循環ガス中の  $^4\text{He}$  濃度が相当高くなっている可能性がある。幾何学的な距離がほとんど取れない中で難しいが、1K ポットとの熱絶縁をもっと良くすべきである。

最近の希釈冷凍機の傾向として、液体ヘリウムを使用しない、いわゆるドライ型希釈冷凍機が主流となっている。本来、航空機実験に搭載すべき冷凍機はドライ型希釈冷凍機だろう。ただ、地上でのドライ型希釈冷凍機についての経験がもう少し必要である。

最後の改良点は、断熱槽を二重の構造にすることである。現在の構造はシンプルであるが、寒剤を使用する際の交換ガスの出し入れにとても不都合である。現状では交換ガスをポンプするのに時間がかかり、短時間で高真空を得るのは難しい。構造は複雑になるが、真空槽を二重にすることで、短時間で高真空が得られるように改善するべきである。

## 4. 固体 $^4\text{He}$ の微小重力下での結晶成長

### 4.1 固体 $^4\text{He}$ の結晶成長について

固体の結晶成長の速さの尺度として結晶成長係数  $k$  を以下のように定義している。

$$V = k\Delta\mu. \quad (1)$$

ここで  $V$  は結晶の成長の速度、 $\Delta\mu$  は化学ポテンシャルの勾

配(駆動力にあたる). 固体  ${}^4\text{He}$  のラフな面の結晶成長係数  $k$  は, 温度の低下とともに絶対零度に向けて発散的 ( $k \propto T^{-4}$ ) に増大する. 十分低温でこの結晶成長係数がとても大きいところでは, 固体  ${}^4\text{He}$  は液体と類似の形状をとる. 液滴の重力中での形状は次の式で与えられる毛細管長  $l_c$  に依存する.

$$l_c = \sqrt{\frac{\alpha}{\Delta \rho g}}. \quad (2)$$

固体  ${}^4\text{He}$  の場合, この長さは約 1 mm である. この値よりより大きいサイズの結晶のラフな面は, 重力エネルギーを最小にするように, すなわち液体のように上面が水平になるように結晶形が変形する. この固体を微小重力下におくと, 表面自由エネルギーを最小にするように結晶の融解成長が期待される. また, その緩和時間が 600 mK ですでに 1 秒以下という短い値なので, パラボリック・フライトの 20 秒間で十分平衡状態に達するものと考えられる.

一方, ラフニング転移を起こした後のファセット面は原子レベルでフラットになった結晶面であるため, 転位のような欠陥が存在しなければ 2 次元核生成で成長するしか方法がなく, 低温での成長は著しく律速される. 通常はらせん転位を介して成長するが, ラフな面に比べるとそれでもはるかに成長速度は遅い. 重力下でファセットが現れる場合は, ラフな面の重力による安定化とファセットの表面自由エネルギーの攻め合いで形状が決まる.

このような状況を背景に, 固体ヘリウムの種々の方位の結晶をサンプルセルの底に生成して, パラボリック・フライトで微小重力環境を生成し, 表面自由エネルギーで決められる平衡形への緩和の様子を調べている. すでに,  ${}^3\text{He}$  蒸発冷凍機での実験で 600 mK 近傍での平衡形への結晶形の緩和については発表している<sup>10-11)</sup>. ここでは, 本希釈冷凍機によって冷却された 140 mK において見出された新現象の一つを紹介したい.

## 4.2 固体 ${}^4\text{He}$ の結晶の生成と方位の制御

固体  ${}^4\text{He}$  結晶の方位を制御する良い方法はないが, 我われは以下の方法を採用している. 地上で融解圧から数ミリ気圧過加圧にした超流動ヘリウムに, サンプルセルの上部にとりつけた超音波トランスデューサーにより 10 MHz の縦波パルス波を数十ミリ秒入射する. それをきっかけとして, トランスデューサー上に核生成をさせることができる<sup>4)</sup>. 生成した結晶核をゆっくり加圧することで大きく成長させると, そのうち壁から離れ落ちて超流動ヘリウム中を落下する. 床に落ちる際に種々の方位の結晶ができる. できた結晶を比較的速く成長させると, ファセットが明確に表れて, 目視により結晶方位を確認できる. 結晶を核生成させる温度を十分低くしておくと,  $c$  ファセットの大きく成長した扁平な結晶が出来易い. この結晶を落下させると  $c$  ファセットが上方を向く確率が高い.

## 4.3 微小重力下における固体 ${}^4\text{He}$ の新現象

これまでの実験で, 重力により水平になっていたラフな面が, 微小重力になるや否やその表面張力を駆動力として球面を目指して変形していくことが確認されている. その際, サンプル容器の壁との関係で変形の仕方は変わってくる. 微小重力下での平衡形へ移行していく様子の一例がすでに報告されている<sup>11)</sup>.

ここでは, サンプルセルの下 1/4 を占める程度の結晶で,  $c$  ファセットが水平に現れている結晶について, 微小重力中での運動の様子をとらえることができたので, その動きについて報告する.  $c$  ファセットとは hcp 結晶の  $c$  軸に直交する結晶面のことを指す. 温度は 140 mK である.

Figure 12 の右半分は重力中での結晶形のスナップ写真であり, 左半分は微小重力下での同じ結晶である. 図から明らかのように, 一見両者の形にはほとんど変化がないように見える. しかし, よく観察すると高さが若干高くなっている. さらに円形状の壁とコンタクトしている部分の形状が異なっている. 微小重力に入ってから Fig. 12 の左の形に移行するのにかかる時間は約 1 秒である. それ以降は全く変化がない.

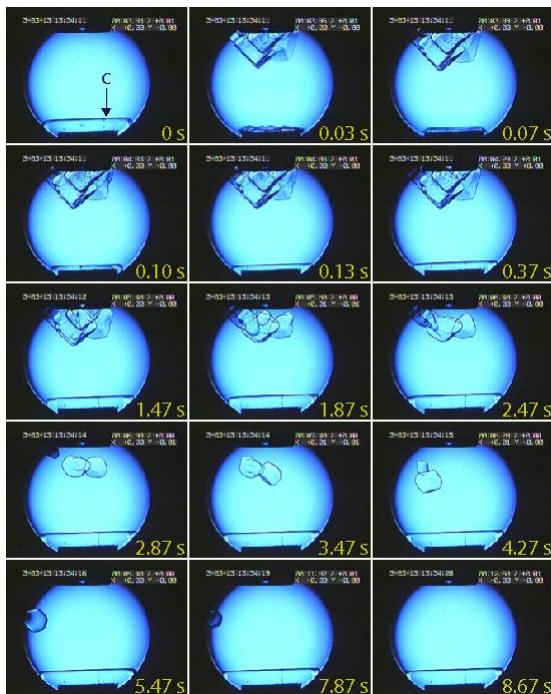
これらの現象は, 微小重力下では毛管長が長くなっているのに対応していると考えられる. 壁近傍のコンタクトラインの変化が若干の融解を引き起こし, その分が  $c$  ファセットの成長として補われたものである.

この微小重力での結晶形が果たして, 平衡形なのかどうかはまだ決め手に欠けるところである. そこで, この結晶を超音波によって揺さぶることを行った. その超音波パルス照射後の結晶の様子を, Fig. 13 に連続写真で示している.

超音波パルスの入射後, トランスデューサー面に結晶が生成されている. 上部にあるサンプルセルのヘリウムの総量は一定であるため, 新たに結晶が生成した分だけ, 下部の  $c$  ファセットが水平に見えている結晶が融解している. Figure 13 では 0.03 秒から 0.13 秒にかけてのフレームが対応している. その後, 新たに生成された結晶は融解を始め, 小さくなつて 2.47 秒以降で壁から離れ, 超



Fig. 12 Crystal shape with  $c$ -facet is compared under 0G and 1.23G. The flat surface on the upper side is  $c$ -facet. Temperature was 140 mK.



**Fig. 13** Nucleation of  $^4\text{He}$  crystal under 0G by the acoustic pulse. Nucleated seeds are seen at the upper part of the window. They begin to detach from the transducer, float around in the liquid, attach at the wall and finally disappear.

流動ヘリウム中を浮遊し始めた。同時に、下部の結晶は成長を開始し、結晶には成長形特有のシャープなファセットが現れている。*c* ファセットの面も明らかに成長し、結晶の高さが回復して元の結晶に戻ろうとしている。

3.47 秒以降、浮遊している結晶は融解しながらも大きい結晶に集約されて 1 つの結晶になり、最後には(5.47 秒) 壁にくつき消失する。同時に下部の結晶はもとの状態へ戻る。この一連の動きはすべて 0 G 状態で起こっている。このように擾乱を加えられても最終的には元の結晶に戻っているということは、Fig. 12 の左半分の結晶が、*c* ファセットが上面に現れた結晶の平衡形であると考えられる。適当な駆動力が存在するときは、明らかに *c* ファセットは数秒のオーダーで成長し、もとの位置まで戻っていることが分かる。これは、Fig. 12 の左の結晶形が平衡形で、*c* ファセットの成長速度が遅いことにより準平衡状態に留められているのではないと考えられる。これらのこととは、地上での実験では検証しえないことである。この一連の現象は微小重力下で行われており、地上でのように上下の意味はない。なぜ、上部のトランسفューサー上に生成された結晶の方が融解し、一旦融解した下部の結晶が成長するのかの理由はまだよく分かっていない。まず、考えられることは一種の Ostwald 成長が起こっている可能性である。下部のトランسفューサーの下に少し空間があり、その空間が固体ヘリウムで満た

されていると考えられる。Ostwald 成長という現象は、多数結晶が存在するときに、時間とともに小さい結晶が融解し、その減少分が大きい結晶の成長に供給されていく現象である。固体ヘリウムでも微小重力中ですでに観測されている<sup>12)</sup>。もう一つの可能性は、航空機実験で 0 G と称している場合でも、実際は 0~0.01 G の間で揺らいでいる。わずかではあるが、下部の方が重力的に安定である可能性は否定できない。詳細は今後の解析を待つかはない。

下部の *c* ファセットの成長という視点で見直すと、適以上のように、140 mK まで固体ヘリウムを冷却することが可能になったため、航空機を利用して興味深い現象をとらえることができた。これらは、量子性の高い固体ヘリウムを用いて、固体の形の基底状態を研究するための大きな一步であると考えられる。今後の進展が期待できる。

### 謝辞

住友重機械株式会社の細田善浩氏には GM 冷凍機のコンプレッサーの構造と微小重力下での振る舞いについて丁寧なアドバイスと詳細な説明をいただいたことに感謝します。本研究は宇宙環境利用科学委員会研究班 WG の支援を受けて実施されたことに感謝します。また、著者の T.T. は日本学術振興会の学術研究員 (PD) として学振から支援を受けたことに感謝します。最後に本研究は東京工業大学 GCOE 「ナノサイエンスが開く量子物理学」の支援を受けており、ここにその感謝をします。

### 参考文献

- \*) Gifford-McMahon の開発者の名前をとった小型気体冷凍機。 $^4\text{He}$  ガスの断熱膨張を利用したもので、小型ながら 4 K の温度が得られている。
- 1) J.A. Lipa, D.R. Swanson, J.A. Nissen and T.C.P. Chui: *Physica*, **B197** (1994) 239.
- 2) Y. Okuda and R. Nomura: *J. Jpn. Soc. Microgravity Appl.* **21** (2004) 159.
- 3) S. Balibar, H. Alles and A. Ya. Parshin: *Rev. Mod. Phys.* **77** (2005) 317.
- 4) Y. Okuda and R. Nomura: *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 111009.
- 5) Ulf Israelson, H.W. Jackson, D. Petrac: *Advances in Cryogenic Engineering*, **33** (1988) 713.
- 6) S. N. Burmistrov and T. Satoh, *Cryogenics*, **41** (2001) 637.
- 7) A. Siri, A. Benoit, M. Caussignac and S. Pujol: *Czechoslovak Journal of Physics*, **46** Suppl. S5 (1996) 2799.
- 8) G. Chaudhry, A. Volpe, P. Camus, S. Triqueneaux, and G. Vermeulen: *Cryogenics*, **52** (2012) 471.
- 9) T. Takahashi, M. Suzuki, R. Nomura, Y. Okuda, K. Kamiya, T. Numazawa and P. Shirron: *Microgravity Sci. Technol.*, **23** (2011) 365.
- 10) T. Takahashi, M. Suzuki, R. Nomura and Y. Okuda, *J. Low Temp. Phys.*, **162** (2011) 399.
- 11) T. Takahashi, R. Nomura, Y. Okuda, *Phys. Rev.*, **E85** (2012) 030601(R).
- 12) T. Takahashi, H. Ohuchi, R. Nomura and Y. Okuda: *New Journal of Physics*, **14** (2012) 123023.

(2014 年 2 月 13 日受理, 2014 年 4 月 15 日採録)