

## 特集

## 冷熱技術の新展開

## 宇宙用ヴィルマイヤ冷凍機

## Vuilleumier Cooler for Spacecraft System

吉村 秀人\*・川田 正国\*\*

Hideto Yoshimura Masakuni Kawada

## 1. はじめに

ヴィルマイヤ冷凍機は1918年に米国のルドルフ・ヴィルマイヤによって発明された<sup>1)</sup>極低温発生用の冷凍機である。この冷凍機は i) 小型・軽量である ii) 耐久性に優れている iii) 熱エネルギーによって直接駆動される等、宇宙環境下で使用される極低温発生用の冷凍機として数々のすぐれた特徴を有している。このため、1960年代に入り、宇宙時代の幕がおくと赤外線検出器用の冷凍機として米国(国防総省とNASA)を中心に盛んに研究開発が行なわれるようになった<sup>2)</sup>。

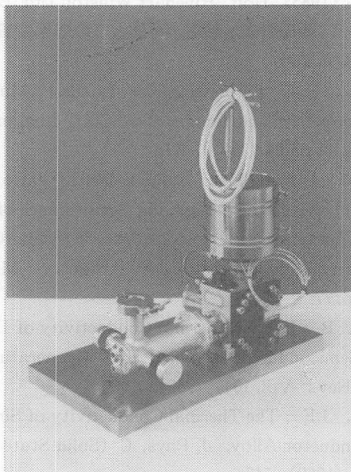
一方我国においてはこの冷凍機の研究は長らく行なわれてこなかった。これはヴィルマイヤ冷凍機の用途が主として、我国ではほとんど需要のなかった軍事用の誘導技術や偵察技術にあったためである。しかし、1980年代の後半になると我国でもリモートセンシング

技術(宇宙からの地球観測技術)への本格的な取組みが行なわれるようになってきた。これにともなって80Kで1Wクラスの冷凍能力を有する宇宙用冷凍機の需要が生じてきた。現在我国では種々のタイプの宇宙用冷凍機の研究開発が盛んに行なわれている<sup>3)</sup>。ヴィルマイヤ冷凍機は最も有望な宇宙用冷凍機の1つとして1985年から4年間、電子技術総合研究所と三菱電機(株)によって研究開発が行なわれてきた。本論文では我々が開発した宇宙用ヴィルマイヤ冷凍機(冷凍能力; 80K, 1W)の構成と性能について述べる。

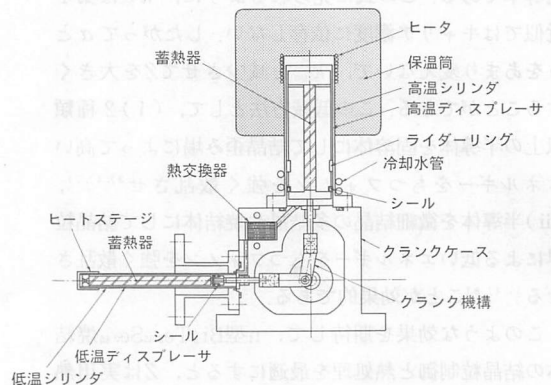
## 2. 構成

## 2.1 構造

図-1にヴィルマイヤ冷凍機の写真と断面図を示す。ヴィルマイヤ冷凍機の外形寸法は高さ280mm, 長さ300mm, 幅150mmであり, また重量は6kgである。高温ディスプレイサと低温ディスプレイサがクランク機構によってそれぞれ高温シリンダと低温シリンダの



(a) 写真



(b) 断面図

図-1 宇宙用ヴィルマイヤ冷凍機

\*三菱電機(株)中央研究所電機基礎技術研究部第4グループ

〒661 尼崎市塚口経町8丁目1-1

\*\*電子技術総合研究所 宇宙環境技術研究室

〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4

内部を周期的に往復運動する。クランク機構の駆動はステッピングモータ（図示されていない、トルク：46 N・cm，出力：5 W）によって行なっている。

各ディスプレイサのストロークはともに10mmであり、高温ディスプレイサの位相は低温ディスプレイサのそれより90° 進んでいる。高温ディスプレイサは直径38.5mmのセラミック製であり、内部にステンレス鋼製の金網（#60，直径10mm）を約250枚積層した蓄熱器を内蔵している。高温ディスプレイサの比較的温度の低い部分にはライダーリング（耐熱・耐摩耗樹脂 VESPEL SP-21製のスプリットリング）とシール（ガラス入りテフロン製のCAPシール）が取り付けられている。低温ディスプレイサはフェノール樹脂製であり、やはり内部にステンレス鋼製の金網（#200，直径8.5mm）を約600枚積層した蓄熱器を内蔵している。低温ディスプレイサの比較的温度の高い一端にはシール（ガラス入りテフロン製のCAPシール）が取り付けられている。

高温シリンダは内径40mmのステンレス鋼管(SUS316)で製作されている。高温シリンダの外周の一端には加熱用のヒータが、そして他端には冷却水管が巻きつけられている。高温シリンダの保温のためにはケイ酸カルシウムの筒が使用されている。低温シリンダは内径10mmの薄肉ステンレス鋼管(SUS316)で製作されている。低温シリンダの一端には銅製のヒートステージがろう付されている。

クランクケースには軽量化のためにアルミニウム合金が用いられている。クランクケースの内部には高温シリンダと低温シリンダとを結ぶ流路が設けられており、またこの流路の途中にはアルミニウム合金製の熱交換器が埋め込まれている。

## 2.2 動作

ヴィルマイヤ冷凍機には作動流体として高圧のヘリウムガスが封入されている。高温ディスプレイサが高温シリンダ内を上下に運動するとヘリウムガスは蓄熱器を通して高温ディスプレイサと逆方向に移動する。これにつれてヘリウムガスの平均温度が周期的に変化する（ヘリウムガスが高温シリンダの上部に移動している時にはヘリウムガスの平均温度は高く、下部に移動している時には低い）。高温シリンダ内でヘリウムガスの平均温度が変化すると圧力も変化する。高温シリンダと低温シリンダは連結されているので高温シリンダ内で生じた圧力変化は同時に低温シリンダ内にも生じる。この圧力変化に同期させて適切な位相で低温

ディスプレイサを左右に運動させると（圧力が比較的高い時に低温ディスプレイサを左から右へ移動させ、圧力が比較的低い時に元にもどす）、ヘリウムガスは低温ディスプレイサに対して正味の仕事をする。この仕事は1サイクルの間にヴィルマイヤ冷凍機が作り出す冷凍量に等しく、発生冷凍量と呼ばれる。この発生冷凍量からロスを差し引いた量が正味冷凍量であり、これが実際に外部に取り出される冷凍量となる。

## 2.3 計測センサ

高温シリンダの温度を計測し、制御するためにクロメル・アルメル熱電対をシリンダヘッドにろう付けしている。低温シリンダの温度を測定するためにヒートステージに金鉄熱電対をハンダ付けしている。またこのヒートステージには正味冷凍量を計測するためにマンガン線ヒータが巻き付けられている。ヘリウムガスの圧力は熱交換器の近傍に取付けられた圧力変換器によって計測した。各ディスプレイサの位置は駆動モータに取付けられたロータリエンコーダによって知ることができる。ヘリウムガスの圧力と低温ディスプレイサの位置から指圧線図がもともと、さらにこの指圧線図の面積から発生冷凍量がわかる。

## 2.4 特徴

宇宙用冷凍機には極めて高い耐久性が要求される。一般に極低温発生用の冷凍機の耐久性を制限する大きな因子として摩耗と不純ガスの発生がある。したがって耐久性の高い宇宙用冷凍機を設計するためにはこの2つの因子を極力小さくする工夫が不可欠となる。

ヴィルマイヤ冷凍機では原理的に系内の圧力はどこでも等しく、このためしゅう動部に働く力は他のタイプの冷凍機に較べて著しく小さい。したがってヴィルマイヤ冷凍機では本質的に摩耗が小さいという特徴を有するが、我々のヴィルマイヤ冷凍機ではこの特徴をより生かすためにスライド軸受やシールに耐摩耗性の高い材料を用いている。

一方不純ガスの発生を極力小さくするために次の工夫をしている。

- i) 超高真空用開発されたガス出しの極めて少ないステッピングモータを駆動モータに採用した。
- ii) 玉軸受用のグリースとして、蒸気圧の極めて小さい超高真空用グリースを用いている。
- iii) シール用Oリングにはガス出しの小さなフッ素ゴムを用いている。
- iv) ヘリウムガスを封入する際には十分な真空排

気と高温シリンダのヒータを利用したベーキングを行なっている。

- v) 不純物 1 PPM以下の超高純度ヘリウムガスを用いている。

### 3. 性能

#### 3.1 初期冷却性能

図-2はヴィルマイヤ冷凍機を起動した後の各シリンダの温度変化を示している。運転条件は表 1 に示すとおりである。高温シリンダの温度が約300K（室温）から923K（650℃）まで上昇するのに約10分必要である。その後高温シリンダの温度は923Kに制御される。低温シリンダの温度は始めゆっくり低下する。これは高温シリンダの温度がこの間あまり高くなく、したがって発生冷凍量が小さいためである。低温シリンダの温度の低下率はその後大きくなるが、15分を過ぎた頃からしだいに小さくなり遂には零になる。これは低温シリンダの温度が低下するに伴ってロスがしだいに増大し、遂にはロスが発生冷凍量に等しくなるためである。この時の低温シリンダの温度を到達温度と言い、またこの温度に到るまでの時間を初期冷却時間という。我々のヴィルマイヤ冷凍機の到達温度は35Kであり、また初期冷却時間は28分であった。この到達温度35Kは1段式のヴィルマイヤ冷凍機としては世界記録である。一般にヴィルマイヤ冷凍機は設計パラメータが多く、このため最適条件を実現して低い到達温度を得る

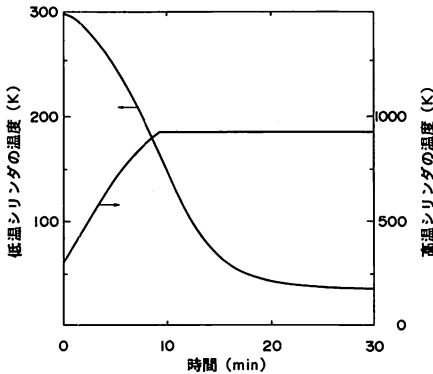


図-2 初期冷却性能

表 1 運転条件

充テン圧力	30atm
運転速度	540rpm
高温シリンダの温度	923 K
中温部の温度	300 K

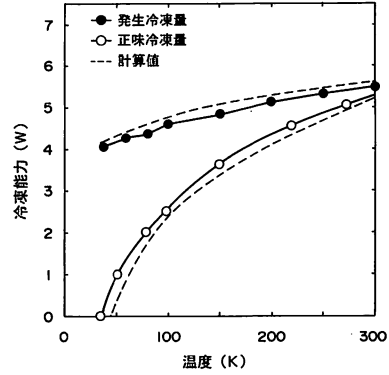


図-3 冷凍能力

ことが困難であった。我々はヴィルマイヤ冷凍機の性能解析プログラムを開発し、これを用いて最適設計を行なった。我々の設計が極めて適切であったことがわかる。

図-2は高温シリンダの温度が室温状態からヴィルマイヤ冷凍機ヲ起動した場合を示しているが、高温シリンダの温度をあらかじめ923Kに保った状態からも起動することができる。この場合には起動直後から低温ディスプレイサの温度が急速に低下する。そしてこの結果初期冷却時間は約 5 分間短縮される。

#### 3.2 冷凍能力

図-3は発生冷凍量と正味冷凍量を低温シリンダの温度の関数として示している。運転条件は表 1 に示されている。発生冷凍量と正味冷凍量の差がロスである。低温シリンダの温度が300K（室温）の時ロスはほとんど零であり、その結果正味冷凍量は発生冷凍量にほぼ等しい。低温シリンダの温度が低下するにしたがってロスはしだいに大きくなる。そして低温シリンダの

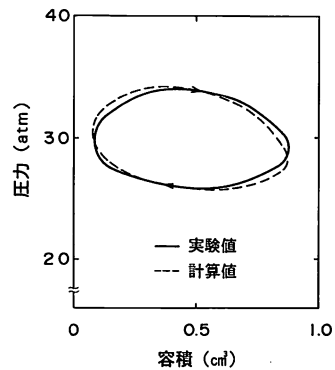


図-4 指圧線図

温度が35Kになるとロスが発生冷凍量に等しくなり、その結果正味冷凍量は零になる。低温シリンダの温度が80Kでの正味冷凍量は2Wであり、これは目標値(80K, 1W)を十分満している。なおこの時のヒータの電気入力は130W、またモータドライバへの電気入力は75W(ただしモータ出力は約5W)であった。図中の破線は計算値を示している。発生冷凍量の計算はSchmidtの理論<sup>4)</sup>を用いて行なった。そしてこの発生冷凍量から各種のロスの計算値を差し引いて正味冷凍量を算出した。計算で考慮したロスの種類は i) 蓄熱器ロス ii) 圧損 iii) 伝導ロス iv) シャトルロス v) ポンプロス vi) 断熱ロスの6種類である。なお各種のロスの意味と計算方法については文献4に記述されている。計算と実験とはいずれの場合も良く一致している。

図-4は低温シリンダの指圧線図を示す。運転条件は表1に示すとおりでありまた低温シリンダの温度は80Kであった。ヘリウムガスの圧力と低温ディスプレイサの位置との関係は図の矢印のように変化する。その結果ヘリウムガスは低温ディスプレイサに対して正味の仕事をすることがわかる。前にも述べたがこの仕事が1サイクル当りの発生冷凍量に等しくなる。なお破線はSchmidtの理論によってもとめた計算値である。計算と実験とは良く一致している。

表2 宇宙ヴィルマイヤ冷凍機の主要性能

到達温度	35 K
初期冷却時間	28 K
冷凍能力	2 W (80 K)
ヒータへの電気入力	130 W (80 K)
モータドライバへの電気入力 (モータ出力)	75 W (80 K) (5 W)
ヒートステージの振動	14 $\mu$ m (rms)
騒音	55 dB(A)
重量	6 kg

3.3 振動と騒音

振動と騒音の計測はいずれも表1に示す運転条件で行ない、それぞれ14  $\mu$ m (rms) と55dB(A)の結果を得た。ただし振動は低温シリンダのヒートステージに加速度計を接着剤によって取付け、低温シリンダの温度が約300K(室温)の状態での計測した。また騒音は低温シリンダの温度が80Kの状態、騒音計をヴィルマイヤ冷凍機から1m離して計測した。

表2にこれまでに得られたヴィルマイヤ冷凍機の主要な性能をまとめて示す。

3.4 真空チャンパ内での性能試験

ヴィルマイヤ冷凍機では高温シリンダや低温シリンダに加えられた熱は最終的にすべて中温部(高温シリンダの高温と低温シリンダの低温との中間温度という意味で中温と言う。中温部とは具体的に7ランクケース等の室温状態にある部分をさす)で除去される必要がある。これまで行なってきた試験ではこの熱は冷却水によって容易に除去することができた。しかしヴィルマイヤ冷凍機を宇宙空間で使用する場合、中温部で除去すべき熱はラジエタによって宇宙空間へ放射される必要がある。そこでこの中温部の熱除去システムを含んだヴィルマイヤ冷凍機の性能を確認するために真空チャンパを用いた試験を計画した。

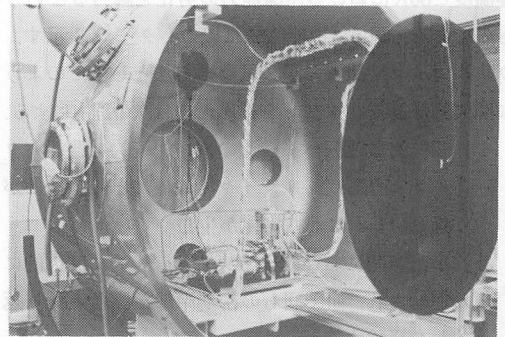


図-5 真空チャンパ内に設置された宇宙用ヴィルマイヤ冷凍機

図-5に真空チャンパ内に設置されたヴィルマイヤ冷凍機の写真を示す。真空チャンパ内には宇宙空間の暗黒部を模擬して、LN<sub>2</sub>で冷却された冷却パネルが設けられている。そしてこの冷却パネルに面してラジエタが設置されている。ヴィルマイヤ冷凍機の中温部から冷却水によって除去された熱はポンプによってラジエ

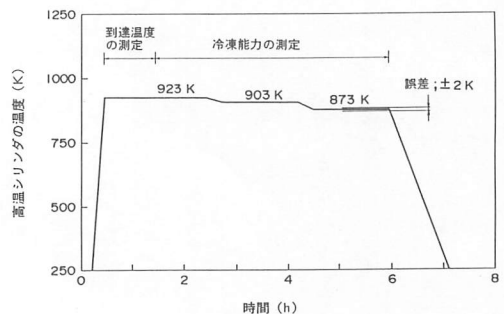


図-6 性能確認試験のパターン

タまで伝達され、ここで冷却パネルへ放射される。ラジェタには電気ヒータが取り付けられており、これを用いてラジェタの温度を調節できる。ヴィルマイヤ冷凍機の中温部の温度はラジェタの温度を調節することによって制御される。

真空チャンバを用いた試験の結果次のことが明らかになった。

- i) 中温部の熱除去システムは良好に動作する。
- ii) ヴィルマイヤ冷凍機の性能すなわち初期冷却性能と冷凍能力は大気中で得られた性能と同等である。

### 3.5 耐久試験

ヴィルマイヤ冷凍機の優れた耐久性を実証するために3年間にわたって耐久試験を続けている。試験の方法は1回8時間の性能確認試験を繰り返し行ない、到達温度と80Kにおける冷凍能力の劣化を調べるというものである。図-6に性能確認試験のパターンを示す。ヴィルマイヤ冷凍機の耐久試験の方法としてこのような間欠的な運転パターンを選んだのは次の理由による。

- i) 間欠的な運転パターンの方が連続的な運転パターンよりもヴィルマイヤ冷凍機にとって条件が厳しい、すなわち劣化が生じやすい。
- ii) 宇宙空間においては冷凍機は一般的に間欠的に運転され、何千回もの初期冷却と昇温の繰り返しを経験する。

現在までに積算運転時間2400時間を記録している。ヴィルマイヤ冷凍機の性能は長期的に多少変動するも

の、これまでのところ目立った性能劣化は認められていない。

## 4. まとめ

宇宙用ヴィルマイヤ冷凍機を試作し、これを種々の観点から評価することによって、この冷凍機の有用性を実証することができた。得られた主な成果は次のとおりである。

- i) ヴィルマイヤ冷凍機の最適設計技術を確立することができた。この最適設計技術を適用することによって、1段階ヴィルマイヤ冷凍機としては世界で始めて35Kの発生に成功した。
- ii) 真空チャンバを用いて、宇宙環境を部分的に模擬した状態でヴィルマイヤ冷凍機を運転することに成功した。
- iii) 宇宙空間での稼動条件を部分的に模擬した耐久試験を3年間続けてきた。この間に積算運転時間2400時間を記録しているが、目立った性能劣化はいまだ認められていない。

## 参考文献

- 1) R. Vuilleumier, U. S. Patent 1, 275, 507(1918)
- 2) A. Sherman; Cryogenic Cooling for Spacecraft Sensors, Instruments and Experiments, Astronaut. Aeronaut. (Nov. 1978) 39
- 3) 藤井源四郎; スペース用冷凍機の開発現状, 宇宙放射線シンポジウムの予稿集 (1990) 18, 宇宙科学研究所
- 4) G. Walker; Cryocooler Part 1: Fundamentals(1983) Plenum Press, New York

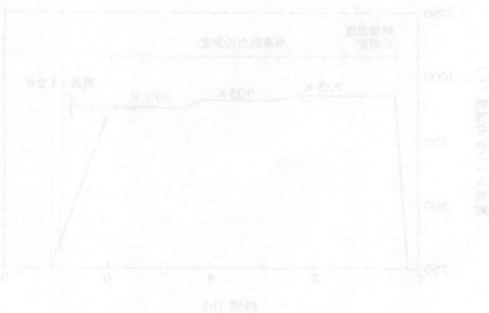


図6 ヴィルマイヤ冷凍機の性能確認試験パターン

