

小型パルスチューブ冷凍機

鴨下 友義 (かもした ともよし)

保川 幸雄 (やすかわ ゆきお)

大嶋 恵司 (おおしま けいし)

1 まえがき

パルスチューブ冷凍機は1960年代に発明された極低温冷凍機で、膨張部に可動機構であるピストンを有するスターリング冷凍機に対して、膨張部に可動部を持たないパイプで構成されているため次の特徴がある。

- 構造が単純
- 冷凍部の低振動化
- 長寿命、高信頼性で保守が容易

パルスチューブ冷凍機は、これらの特徴から長時間の無保守運転や低振動が要求される用途への利用が期待され、民生用としては通信分野などでの高温超伝導デバイスの冷却や医療用などに、宇宙用としては赤外線デバイスなどの冷却用への応用が有望である。

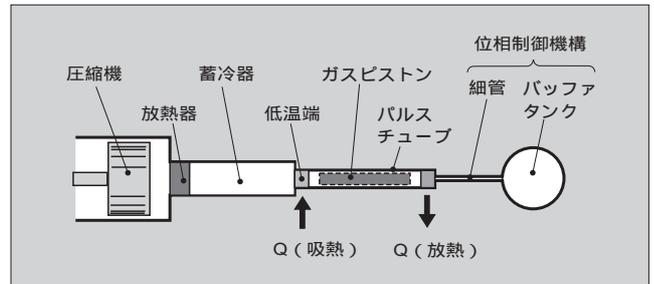
富士電機では、1978年に赤外線センサ用のスターリング冷凍機を開発して以来、これまで人工衛星搭載用として冷凍出力1.4W(70K時)のスターリング冷凍機を開発してきた。この冷凍機は長寿命化を狙い50,000時間の信頼性を確保している。近年はこの高信頼性技術をベースに小型・高効率のパルスチューブ冷凍機の開発に取り組み、冷凍出力2.5W、冷凍温度70Kの小型パルスチューブ冷凍機を開発した。

本稿では、新たに開発した小型パルスチューブ冷凍機について紹介する。

2 冷凍機の構成と原理

パルスチューブ冷凍機は図1に示す模式図のように、圧縮機、放熱器、蓄冷器、低温端、パルスチューブおよび位相制御機構から構成される。冷凍機の基本サイクルはスターリングサイクルに基づいている。スターリングサイクルとは、二つの等温変化と二つの等容変化から形成される冷凍サイクルである。パルスチューブ冷凍機とスターリング冷凍機の違いは、膨張機である。スターリング冷凍機の場合、膨張機はピストンとシリンダにより構成されるが、パルスチューブ冷凍機の膨張機には可動部がなく

図1 パルスチューブ冷凍機の模式図



パルスチューブ内のガス(これを「ガスピストン」と称する)がその役割を担っている⁽²⁾。

圧縮機はピストンの往復動によりガスの周期的な圧力振動を発生する。放熱器は圧縮仕事により発生した熱を系外へ捨てる。蓄冷器は放熱器と低温端の間にあり、低温端で発生した冷熱を蓄積する熱交換器としての役割を果たしている。ガスピストンがパルスチューブ内で動作し、膨張仕事をして冷凍を発生させるためには、圧力とガスピストン位置が最適な位相をとる必要がある。そのためにインダクタンス成分と抵抗成分に相当する細管とキャパシタンス成分に相当するバッファタンクから成る位相制御機構を用いている。

パルスチューブ冷凍機はその構成からインライン形とリターン形に分類される。インライン形とは図1の模式図に示すように蓄冷器、低温端、パルスチューブが直線状に並んだ構成であり、リターン形とは低温端を起点として蓄冷器とパルスチューブが折り返された構成である。インライン形はパルスチューブ低温端での整流が容易なため冷凍機としての効率は高い。一方、リターン形は被冷却体の取付け自由度が大きい。本開発では、高効率を目指すためインライン形を採用した。

3 パルスチューブ冷凍機

3.1 開発経緯

富士電機ではこれまで、赤外線センサの冷却を目的とし



鴨下 友義

工業用計測発信器の設計、燃料電池の開発、設計、クライオクーラの開発に従事。現在、東京システム製作所CCプロジェクトゼネラルマネージャー。



保川 幸雄

冷凍機および超電導応用機器の研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所メカトロニクスグループ主任研究員。低温工学協会会員。



大嶋 恵司

クライオクーラの研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所メカトロニクスグループ(東京分室)主任研究員。

い。これは設計点を越えたところでの運転であるため、 P ロス（銅損）が大きくなり、消費電力が増大しているものと考えられる。

3.3 基本構成と設計

パルスチューブ冷凍機の開発にあたっては、高効率化を目指した膨張機の構成パラメータの最適化、さらには膨張機と圧縮機との組合せの最適化を図った。また、長寿命・高信頼性のためには、ピストン支持にフレクシャベアリングを採用し、ピストンとシリンダがしゅう動しないクリアランスシール構成とするとともに、ガスを汚染する材料の使用を極力低減した。

3.3.1 膨張機

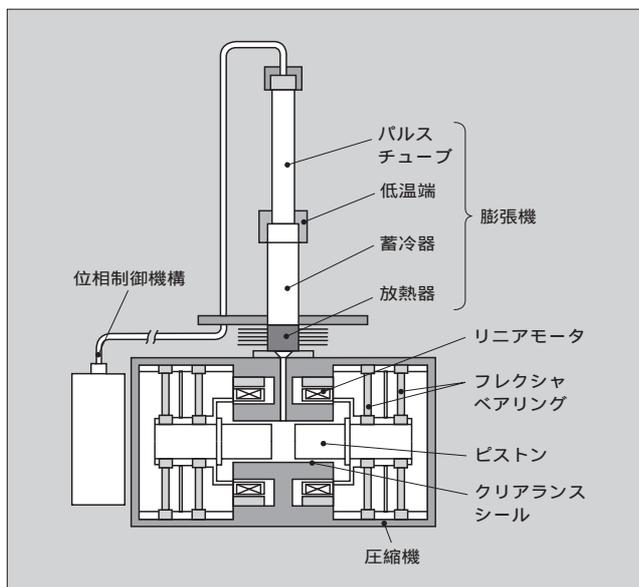
図6にパルスチューブ冷凍機の断面図を示す。膨張機は可動部を持たないシンプルな構造であるが、蓄冷器寸法やパルスチューブ寸法などの最適化設計を行うのは、計算と合いにくいため容易ではない。

膨張機の高効率化を図るためには、圧縮機から与えられたPV仕事に対して、

- (1) 発生冷凍量すなわち図示冷凍出力を大きくする。
- (2) 低温端への熱侵入量を小さくする。

ことが肝要である。(1)を満足するためには、圧力振幅とガスピストン振幅を大きくし、その両者の位相差を90°に近づける。(2)を満足するためには、熱侵入量のうち半分以上を占める蓄冷器の非効率による熱の持込みを低減する必要がある。(1)はパルスチューブ寸法と位相制御機構の構成の最適化が必要であり、(2)は蓄冷器の構成である表面積と熱容量が大きくかつ圧力損失の小さい蓄冷材が必要となる。そこで、蓄冷器寸法、蓄冷器材料、パルスチューブ寸法をパラメータとして冷却性能試験により最適値を定めることとした。その結果、パルスチューブ容積と蓄冷器容積の比には最適値が存在することを見だし、蓄冷器およびパルスチューブの寸法を決定した。また、運転条件では

図6 パルスチューブ冷凍機の断面図



圧力を上げることで性能が向上するが、圧力容器設計も考慮し3.1 MPaとした。運転周波数は位相制御機構の最適化と圧縮機の適合性も考慮して50 Hzに決定した。

低温端は作動ガスとの熱交換およびパルスチューブ低温側の整流を行う重要な部分である。また、放熱器も同様に熱交換と整流が要求される要素である。そこで、伝熱性能の向上と整流を併せ持つ構成に工夫を施し、構造を決定した。

3.3.2 圧縮機

圧縮機は、高信頼性、低コスト、コンパクトが要求されている。この要求を達成するために、以下のような特徴を持たせている。各部の構成と名称は、図6のパルスチューブ冷凍機の断面図に示している。構造上の特徴は次のとおりである。

- (1) 一組のピストンを対向して配置することにより、それぞれの慣性力を相殺し発生振動を低減する。
- (2) ピストンを駆動するリニアモータ（VCM）の可動部は、二組のフレクシャベアリングで片側から支持しており、従来用いられていたリニアモータの可動部を両側から支持する方式と比較すると、軸方向寸法の大幅な短縮を可能にしている。
- (3) ピストンは数十μmの微少すきま（クリアランス）を介してシリンダに挿入され、しゅう動のないクリアランスシールを構成している。
- (4) リニアモータの継鉄部と外部フレームを兼用させることにより、小型・軽量化を図っている。
- (5) 各構成部品は、プレス加工・射出成形など量産効果の高い方式を盛り込み、高精度な機械加工は最小限にして、低コスト化を図っている。

3.3.3 寿命・信頼性

冷凍機の構成の中で、寿命・信頼性に影響を及ぼす要因は圧縮機のピストン支持部およびリード線の疲労、作動ガスの汚染、などである。このため、クリティカル要素について個別に信頼性評価を実施している。

(1) フレクシャベアリング設計と信頼性

冷凍機の部品の中で疲労設計の必要なものは可動部材であるフレクシャベアリングとリード線である。これらについては、有限要素法による非線形構造解析および試作によるつぎ合わせ評価をすることにより設計手法を確立し、それぞれの部品について形状・寸法を最適化している。図7に有限要素法によるフレクシャベアリングの応力解析例、図8に変位・負荷特性の解析と実測の比較例を示す。フレクシャベアリングとリード線の材料は、疲労限度の高い銅合金を用いており、疲労限界値に対する安全率は寿命50,000時間の設計実績がある衛星搭載用冷凍機の基準に準拠している。リード線については、配置する空間に余裕があるためフレクシャベアリングより大きい安全率を採用し、信頼性を向上させている。

上述のフレクシャベアリングで可動部（モータコイル、ピストン、リード線）を支持した場合のピストン先端における直進度は、設計仕様値を満足しており、ピストンとシ

図7 有限要素法による解析例

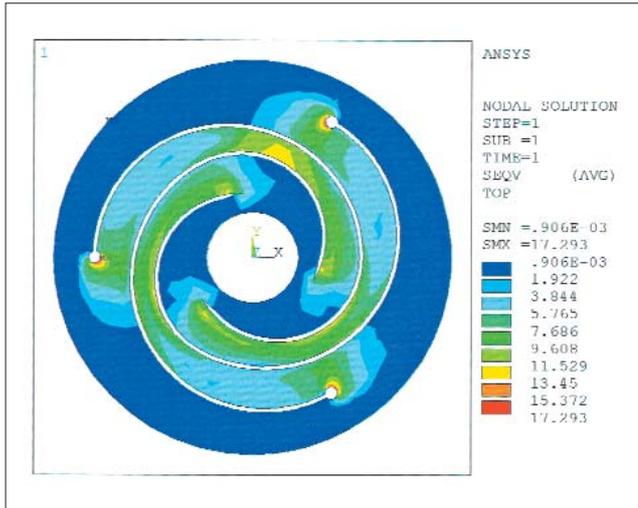
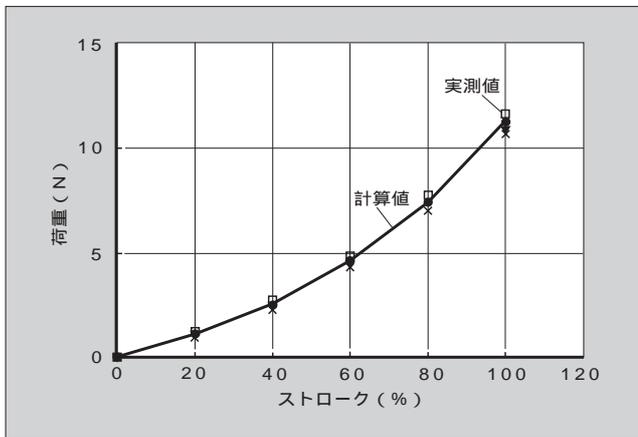


図8 フレクシャベアリングの変位-負荷特性



リング間を非接触でシールするクリアランスシールの構成を可能にしている。このピストン先端の直進度を評価した連続試験結果を図9に示す。直進度は、材料の疲労限度といわれる 10^8 回以上(約 5,000 時間の運転)の繰返し動作の前後で変化がない。この試験は、現在も継続中である。

図9 フレクシャベアリングの直進性

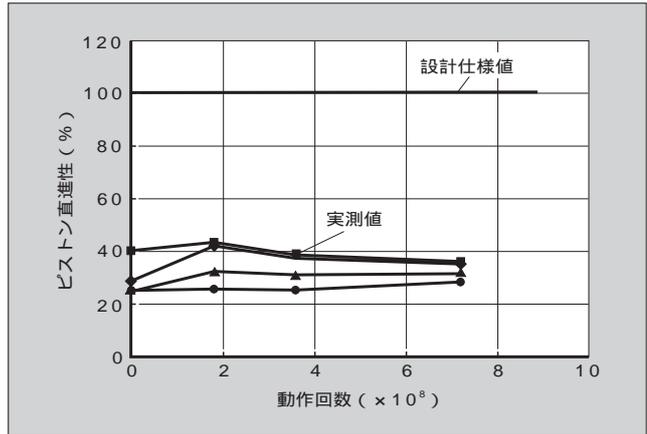
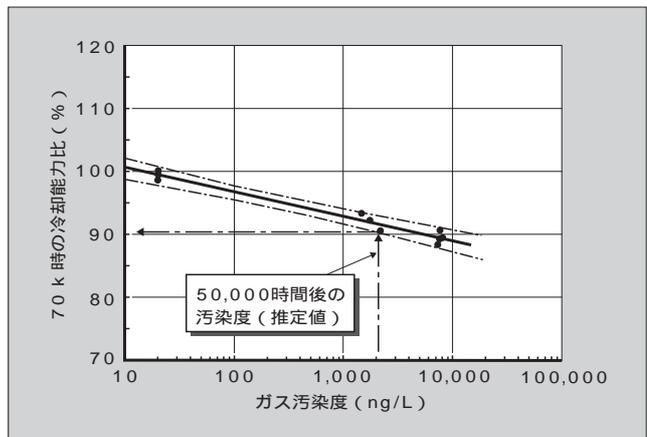


図10 ガス汚染度と冷却能力の関係



4 あとがき

パルスチューブ冷凍機開発の現状について述べた。液体窒素温度領域まで冷却するパルスチューブ冷凍機は通信分野などでの高温超伝導デバイス冷却や精密磁気計測を用いた医療分野用などへの適用が期待されている。今後、民生用として普及するためには低コスト化が課題であり、これまでに培った技術をベースにコスト低減に注力していく所存である。

参考文献

- (1) 藤並太．超小型冷凍機の開発動向．低温工学．vol.30，no.2，1995．
- (2) Matsubara, Y. et al. An Experimental and Analysis Investigation of 4K Pulse Tube Refrigerator. 7th International Cryocooler Conference Proceedings. Air Force Phillips Laboratory Report PL-CP-93-1001, 1993, p.166-186.
- (3) 藤並太ほか．衛星搭載センサ冷却用クライオクーラ．富士時報．vol.70，no.6，1997，p.338-342．
- (4) 保川幸雄ほか．小型パルスチューブ冷凍機の開発．第65回低温工学・超電導学会講演概要集．2001，p.272．



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。