特機分野におけるパルスチューブ冷凍機の適用

竹内　孝行（たけうち　たかゆき）　松下　智行（まつした　ともゆき）　大嶋　恵司（おおしま　けいし）

1　まえがき

富士電機のパルスチューブ冷凍機の基礎技術は，1970年代に国内初の赤外線暗視装置用小型スターリング冷凍機の製品化によって築かれた。その実績とその後の継続した技術開発により，国内初を含めた三つの地球観測用衛星に搭載され，そのミッションにおいて，高い品質と信頼性に裏づけされた小型スターリング冷凍機が数万時間にわたる長時間運転を実証できた。

その後，その技術がより多くの低温応用システムへ適用されることを狙って，新たにパルスチューブ冷凍機を開発し，2005年6月，製品化を完了し，販売を開始した。

本稿ではパルスチューブ冷凍機の特機分野における適用要件について紹介する。

2　パルスチューブ冷凍機の概要

パルスチューブ冷凍機は，**図1**の外観に示すように圧縮機，膨張機および位相制御機構から構成される。冷凍機内部は高圧のヘリウムガスが封入されており，圧縮機ではピストン運動によりガスを圧縮し，膨張側へ送出する。膨張機にはスターリング冷凍機と異なり，寒冷発生用の機械的ピストンを持たず，ガス塊（仮想ピストン）の位置移動と圧力変動がパルス管および位相制御機構により適正な位相差を設けることによって冷却し，蓄冷器に冷熱を蓄えるようになっている。**図2**にスターリング冷凍機と比較した原理図を示す。

スターリング冷凍機では，膨張機側のピストン運動がシリンダとの接触や気密シールの摩耗を生じ，寿命が短くなるという欠点があったが，パルスチューブ冷凍機は，膨張機側に機械的可動部品がないために，高い信頼性と長時間の無保守運転が可能である。

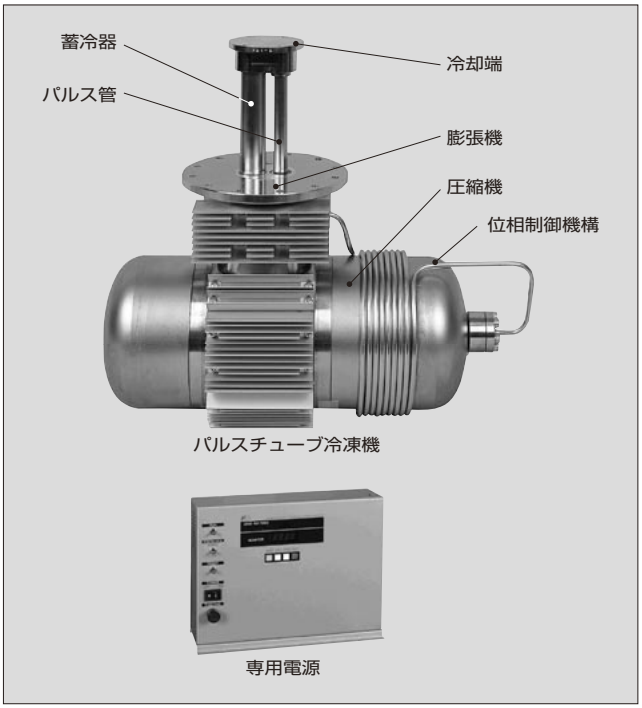
表1にスターリング冷凍機とパルスチューブ冷凍機の比較を示す。スターリング冷凍機は，寿命は短いものの，パルスチューブ冷凍機より熱効率がよいため，小型にできるという利点がある。特機分野における両冷凍機の使い分けは，信頼性を重視するか，小型化を志向するかによって決められる。衛星搭載のように長時間無保守が必要なものにはパルスチューブ冷凍機が優位であり，赤外線暗視装置のように運用時間は限られるが，小型化が要求されるものにはスターリング冷凍機が採用される。

3　特機分野における用途とその要件

パルスチューブ冷凍機は，汎用分野または特機分野にかかわらず極低温の用途で無保守運転を必要とする冷凍機に最適である。

ここで，環境温度や外部振動などの冷凍機が使われる環境仕様比較において，主に室内環境で外部振動が地震レベルであるものを汎用分野とし，それ以外のものを特機分野と定義する。

図1　パルスチューブ冷凍機と専用電源の外観



竹内　孝行

交通システム，特機システムなどのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部防衛技術部担当課長。

松下　智行

極低温小型冷凍機の開発・設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社機器本部東京工場ファインテック機器部主任。

大嶋　恵司

極低温小型冷凍機（スターリング，パルスチューブ）およびその応用機器の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社機器技術研究所主任研究員。日本機械学会会員。

図2　パルスチューブ冷凍機の原理図

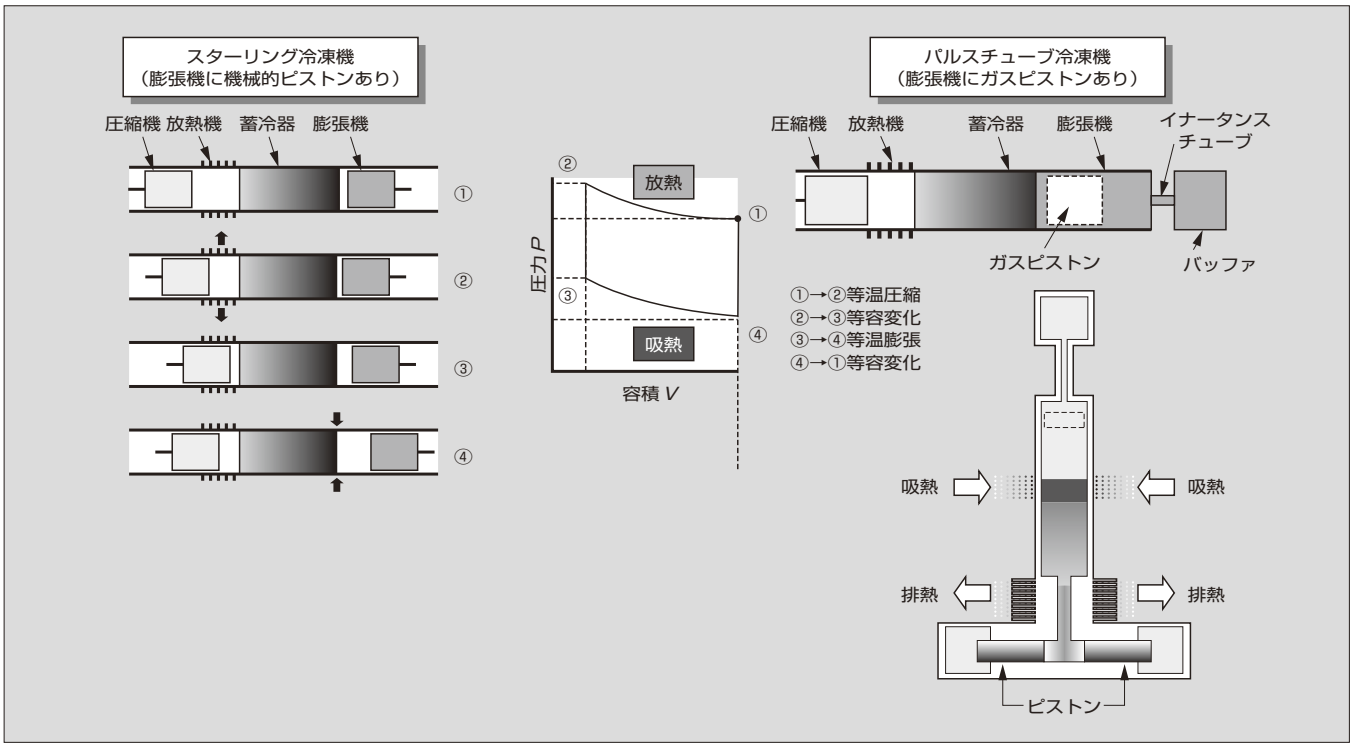


表1　スターリング冷凍機とパルスチューブ冷凍機の比較

比較項目	スターリング冷凍機	パルスチューブ冷凍機
大きさ 質　量	○小型 ○軽量	○スターリング冷凍機よりやや大きい ○スターリング冷凍機よりやや重い
冷凍能力	○15W以下	○10W以下
発生振動	○やや大きい ○制振制御が必要	○小さい
寿　命 信頼性	○やや長い（1年） ○部品点数がやや多い	○特に長い（6年以上） ○部品点数が少ない
保　守 点　検	○1回/年 ○膨張機のシール交換	○6年以上無保守 ○部分交換できない
温度環境影響	○パルスチューブ冷凍機より小さい	○高温時に大きい
取付け姿勢影響	○小さい	○小さい
運　転	○制振制御が複雑	○容易
ライフサイクルコスト	○やや安価	○安価

汎用分野におけるパルスチューブ冷凍機の適用分野としては，高温超伝導材料を使った研究設備，蛍光X線分析装置などのセンサやデバイスの冷却における液体窒素装置との置換え，また，移動通信設備において隣接周波数帯の干渉防止を目的とした超伝導フィルタ冷却の用途が考えられる。特に移動通信設備は，日本において数万局，世界中では数百万局といわれる通信中継局への設置を考えるとその数も多く必要である。

特機分野では，例えば衛星搭載の場合の特殊仕様として以下のことが要求される。

○打上げ時の大きな機械力に耐えること
○宇宙環境における放射線影響と排熱機構
○長期運用に耐える運転寿命
○冷凍機が発生する機械力やトルク抑制
○小型・軽量
○低消費電力
○地上試験における設置姿勢

世界における衛星搭載用小型冷凍機は，発生振動や高信頼性の観点からパルスチューブ冷凍機になる傾向にある。富士電機は，衛星搭載用スターリング冷凍機の実績からこれらの仕様を満たすパルスチューブ冷凍機を開発することができる。衛星における小型冷凍機の発生振動は，精密測定の検出器の“揺らぎ”の影響や照準設定，また衛星の姿勢にも影響する課題であり，パルスチューブ冷凍機の採用により0.1N以下の機械的じょう乱力にすることが期待されている。この要求の達成のためには，圧縮機側のピストン運動を対向ピストン配置で相殺したり，可動質量を均一にしたりするほか，ピストン位置検知による振動抑制運転などが考えられている。

パルスチューブ冷凍機の信頼性は，圧縮機における可動部品の耐久性と封入されたヘリウムガスの汚染による冷凍能力低下，および製造時のコンタミネーションによる偶発故障などの管理によって確保される。

2006年3月現在，パルスチューブ冷凍機は，屋外を含め，複数台の冷凍機を連続運転を継続しており，3万時間以上経過している。

4　富士電機のパルスチューブ冷凍機の性能と適用

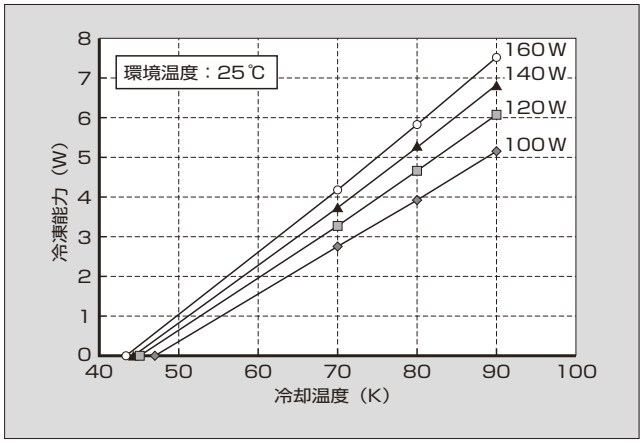
富士電機のパルスチューブ冷凍機の仕様を**表2**，冷凍能力を**図3**に示す。

図 3 において，標準仕様の冷凍能力は，2.5 W 以上（環境温度 25 ℃，冷却端温度 70 K，入力電力 100 W 時）である。冷凍能力は，入力電力が一定であれば，所要冷却温度が高くなるほど大きくできる。また，入力電力を大きくしても大きな冷凍能力を得ることができる。富士電機のパルスチューブ冷凍機では，最大入力電力（160 W）時に液体窒素温度（77 K）において 5 W 以上の冷凍能力が得られる。なお，室温（25 ℃）における最低冷却温度は 45 K である。

表 2　パルスチューブ冷凍機の標準仕様

冷却温度	70K
冷凍能力	2.5W以上
温度安定度	±0.5K
消費電力	100W
質　　量	10kg
寸　　法	最大W266×D121×H251（mm）
設計寿命	5万時間以上
環境温度	0～40℃

図 3　パルスチューブ冷凍機の冷凍能力特性



パルスチューブ冷凍機は，高温環境では著しく能力が低下するため，環境温度を考慮した設計が必要である。

パルスチューブ冷凍機の冷却端を上下および左右の全方向に設置姿勢を変えた場合の冷凍能力の変化は 3 % 以下であり，冷凍機の取付け自由度が高い。これは GM（ギフォード・マクマホン）方式の冷凍機が 10 %の変化があることと比較して優位である。

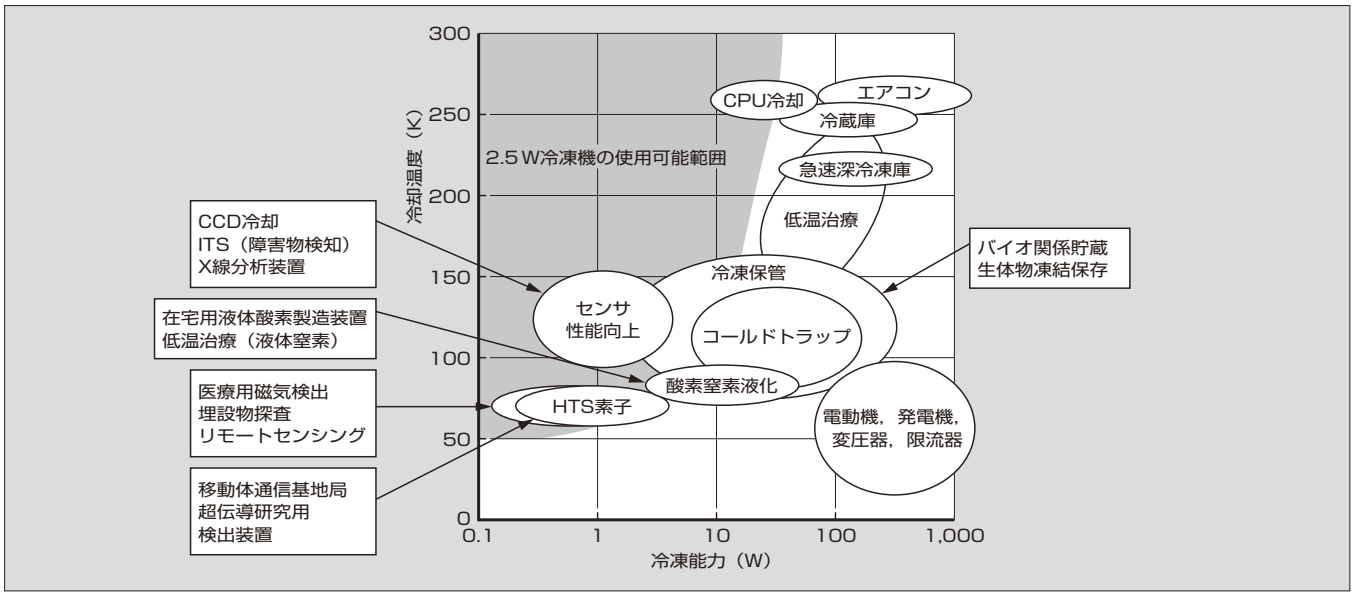
図 4 に富士電機のパルスチューブ冷凍機の用途を示す。横軸は冷凍能力，縦軸は冷却温度を示し，網掛け部分（2.5 W 冷凍機の使用可能範囲）の領域が用途となる。標準仕様の冷却温度 70 K，冷凍能力 2.5 W 付近では，移動通信の超伝導フィルタ冷却，赤外線センサ冷却，高温超伝導材料の冷却などのセンサやデバイス冷却に適用できる。この温度より高い 80 ～ 150 K の領域では，CCD などの環境温度による熱雑音の抑制や，有害ガス除去を目的としたガスの液化，レーザ用希ガスの液化などの用途がある。さらに高い温度では，サーバ CPU の冷却用が考えられる。

5　あとがき

超伝導材料によるシステムの高精度化は今後の新しい装置として期待が高かったが，ヘリウム温度に冷却する必要があり，その侵入熱対策が必要であったり，冷凍装置の寸法が大きくなるため，普及するまでには至っていない。高温超伝導材料が登場する段になり，冷凍装置の小型化，容易な侵入熱防護が可能となり，超伝導でないシステムと比較しても小型で高性能なものが出来上がりつつある。その役割の一助となる冷凍機が小型パルスチューブ冷凍機である。

富士電機は，汎用のシステムにおいてはもちろん，環境仕様や振動仕様が厳しい特機分野の冷凍機であっても，高信頼性の要求に応えられるパルスチューブ冷凍機を今後とも提供していきたい。

図 4　パルスチューブ冷凍機の用途



e-Front runners

＊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。