

# スターリングサイクルを利用した温度差発現装置の試作と検証

○中木村雅史<sup>A)</sup>、千田進幸<sup>A)</sup>、福森 勉<sup>A)</sup>、立花一志<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 部局系技術支援室 工学技術系第2技術課 (装置開発)

## 概要

熱サイクルの一つであるスターリングサイクルは、理論上、最も効率の高い熱サイクルであり、環境に低負荷という特徴を持ち合わせている。スターリングサイクルを用いた模型エンジンは構造がシンプルであり、多くの大学・高専などで、教育教材や実習テーマとして採用されている。本サイクルはエンジンだけでなく、逆サイクルの応用により、冷凍機として利用することもできる。スターリング冷凍機はフロンなどの冷媒を使わない、極めてクリーンな冷凍機として知られ、国際的な研究開発の対象となっている。実際にスターリング冷凍機は多くの企業で技術開発が進められ、商品化もなされている。しかしながら、冷凍機作製にあたっては作動に必要な温度差を数百度まで上げられるエンジンと異なり、発現温度差が小さいため、製作にデリケートな精度が要求される。そのため、エンジンに比べ、参考文献および試作例が極端に少ないのが現状である。

したがって本技術研究は次の2点の目的を持って実施する。(1)温度差発現装置を試作する。(2)自作した装置の性能評価を行う。試作機種は構造が極めてシンプルなスターリング型パルス管冷凍機を採用した。パルス管冷凍機は、膨張部に実体のピストンが存在せず、代わりにガスピストンが発生し、無潤滑、無摺動の機構となっている。したがって装置の簡略化、小型化、および低振動化を実現できる極めて優れた冷凍機である。装置の構成および寸法形状については、「スターリングエンジン国際会議 2007」併催の展示会において、濱口らの出展装置および発表論文<sup>(1)</sup>を参考にした。構造上の特徴は高精度摺動が必要なシリンダ・ピストン部分に市販のガラス製注射器を用いていることである。これにより無潤滑・低摩擦ピストン運動を実現している。完成後の性能評価においては、顕著な冷却性能影響因子である蓄冷材の材質をパラメータにとり、最低到達温度および到達時間の計測を実施した。本試作機のベストデータは $-32^{\circ}\text{C}$ であり、室温 $21^{\circ}\text{C}$ との温度差は $53^{\circ}\text{C}$ であった。また、到達時間8 minであった。

## 1 スターリング冷凍機の動作原理

はじめにスターリングエンジンの動作原理の説明をした後、スターリング冷凍機の原理を述べる。

### 1.1 スターリングエンジン

図1は熱を仕事に変える機構を示す。①の状態ではシリンダを加熱し、中の気体が膨張すると、ピストンが右に押される(②)。次に加熱をやめて、同じ場所を冷却する(③)と、気体が凝縮されて、ピストンが元の位置に戻る(④)。以上の動作を繰り返すことにより、熱エネルギーをピストンの往復運動に変換することができる。ただし、この場合ピストンの動きに合わせて加熱と冷却のタイミングを制御しなければならないため、高速運動させることが非常に難しい。そこで2つのピストンを用いた図2のような機構を考える。ここではシリンダ中央部の再生器を境に、加熱部と冷却部が完全に固定されている。再生器は多孔質体材料であり、気体を自由に通す。シリンダ左側の気体が加熱されると(状態①)、気体は膨張して、左ピストンを左方向に押し出す(状態②)。その状態で左ピストンを外部の力で右に移動させると、気体が冷却部に流入する(状態③)。これにより気体が冷却され、ピストンが左に押し戻される(状態④)。この時点で①の状態に戻って

いるので以降はこのサイクルを繰り返すことで熱を往復運動に変換できる。さらに状態②において外部力でピストンを操作する代わりに、両ピストンをクランクで連結することにより、自立運動させる機構を作ることができる。このとき、左右ピストンの位相差を適切な値に設定することで、中の作動流体にスターリングサイクルを行わせることが出来る。これがスターリングエンジンの動作原理<sup>(2)</sup>である。

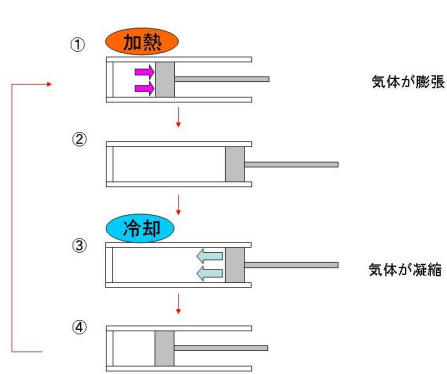


図1 熱を仕事に変換する機構

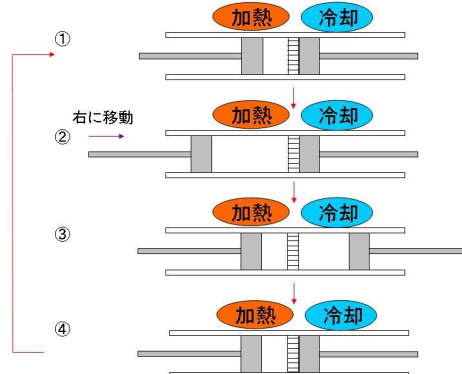


図2 ディスプレーサを用いた機構

## 1.2 スターリング冷凍機

上で述べたとおり、スターリングエンジンは熱を吸収し、往復運動を生み出す装置である。図3に示すように、スターリングエンジンは加熱部から熱を吸収し、往復運動を行う（上図）。ここで加熱を止めてピストンを強制運動させることを考える。このとき中の気体は同じ状態変化を続けるため、加熱部から熱を吸収しようとする（中図）。これにより、加熱部は冷却される（下図）。これがスターリング冷凍機の原理である。

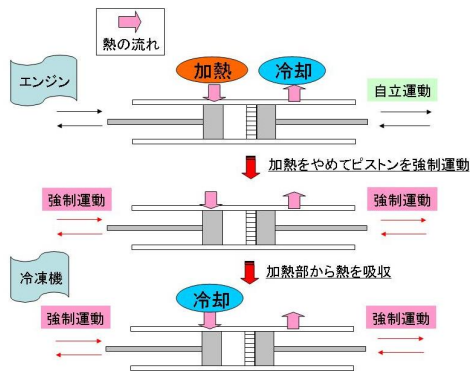


図3 冷凍機の原理

## 2 パルス管冷凍機

ここでは本研究で試作したスターリング型パルス管冷凍機について述べる。パルス管冷凍機の機構はスターリング冷凍機の一方のピストンを取り除き、壁で塞いだものとなっている（図4中段）。この状態でピストンを往復運動させると、シリンダ内にガスピストンが発生し、周期振動を行う。ここで、壁にタンクをつないだゴム管を通し、さらにゴム管の長さを調節することで、ピストンとガスピストンの位相差を適切な値に設定することができる。このようにガスピストンを利用することで、1つのピストンで冷却効果を得ることが出来る。これがパルス管冷凍機の原理である。パルス管冷凍機の長所として、無潤滑、無摺動、低振動な

どが挙げられる。試作の際は、高精度摺動が必要なシリンダ・ピストン部分に市販のガラス製注射器を流用して無潤滑・低摩擦の機構を実現した。実際に試作したパルス管冷凍機を図5に示す。この装置における冷却部はアクリルパイプの中につめられた蓄冷材の上端部分である。

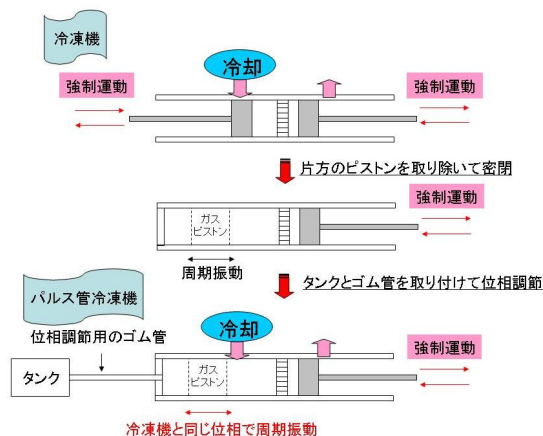


図4 スターリング型パルス管冷凍機の機構

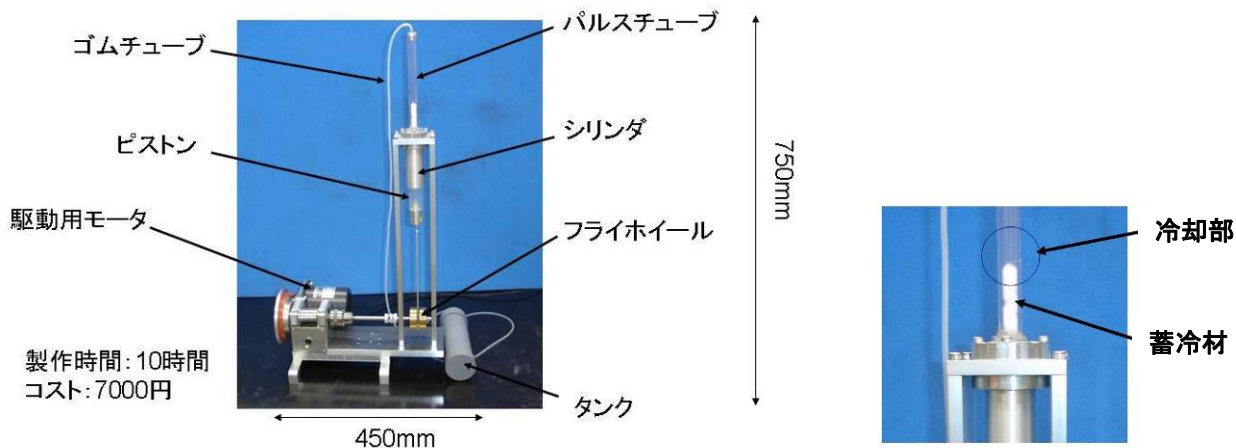


図5 試作したスターリング型パルス管冷凍機

### 3 性能評価

自作した装置を使って温度差発現実験を行った。図6は3種類の蓄冷材（ガーゼ、スチールウール、脱脂綿）を使った場合の時間-温度変化のグラフを表す。モータ回転数は715rpmに設定し、作動流体は空気を用いている。最も温度が下がったのは脱脂綿で、8分で $-32^{\circ}\text{C}$ という結果が得られた（室温 $21^{\circ}\text{C}$ ，大気圧下）。図7に冷却により霜が付着した様子を示す。尚、実験中は蓄冷材および冷却部周辺には発泡スチロールのカバーを自作して外気と遮断させた。

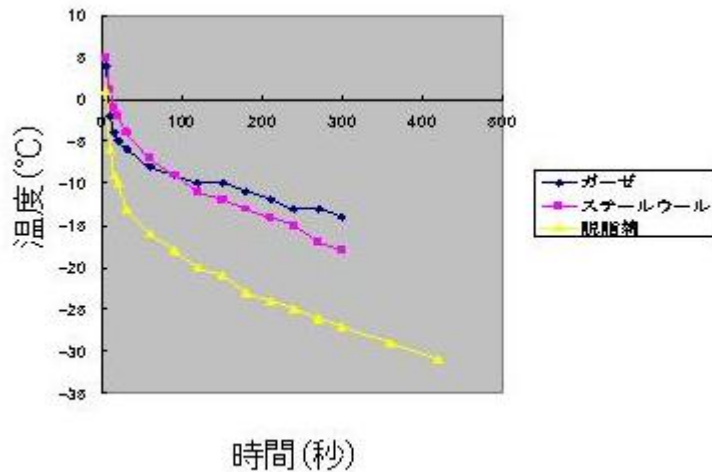


図 6 それぞれの蓄冷材における時間－温度変化



図 7 管内に付着した霜

#### 4 まとめ

以下に本技術研究の成果を述べる。

- 1) 構造が極めてシンプルなスターリング型パルス管冷凍機を試作し、動作確認を行った。
- 2) 自作した装置の性能評価においては、室温 21°Cの大気圧下において 8 分で−32°Cという結果が得られ、温度差 53°Cを実現した。

今後の課題として、本機を応用した製氷機や赤外線センサーの冷却装置の開発、あるいは安全にエネルギー変換機構を学べる教育教材としての適用を目標にし、試作装置としての価値を高めていく考えである。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、明星大学の濱口和洋教授にはスターリングエンジン国際会議展示会において、冷凍機の試作に関する懇切なる助言を頂き、さらに設計の詳細を記述した学会論文を送付して頂くなど、多大なご支援を賜りました。先生のご協力に心から感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Kazuhiro Hamaguchi, Yoshikatsu Hiratsuka, Takeshi Hoshino“Performance Characteristics of an Atmospheric Pulse Tube Refrigerator”, 2nd International Energy Conversion Engineering Conference 16-19 August 2004, Providence, Rhode Island
- [2] 兵頭務, 米田裕彦共著, “スターリングエンジン-その生い立ちと原理-”, パワー社