C02 流動部に二重管を用いた 1 ピストン型スターリング冷凍機の研究

Study on Single Piston Stirling Refrigerator Using a Double Tube for the Flow Area

○学 川岸 祐輝(日本大学) 正 田中 勝之(日本大学)

正 田中 誠(日本大学)

Yuki Kawagishi, Katsuyuki Tanaka and Makoto Tanaka

Nihon University, 7-24-1 Narashinodai Funabashi-shi

A refrigerator using a double tube was proposed to miniaturize the pulse tube refrigerator. To design a double tube refrigerator, experiments changing parameters such as pulse tube volume, tube length, tank volume were carried out by a pulse tube refrigerator. On the basis of experimental results refrigerator using a double tube for the flow area composed of regenerator and tank was constructed. Experiment by double tube type refrigerator was carried out. However, cooling performance was not obtained. Then structure of double tube type refrigerator was reconsidered and its improvement was proposed.

Key words : Stirling refrigerator, Pulse tube refrigerator, Regenerator, Double tube

1 はじめに

スターリングエンジンがスターリングサイクルで動作するのに対し、スターリング冷凍機はその逆サイクルで動作している。これらサイクルを成り立たせるために通常は 2 つのピストンと再生器が必要である。また、2 つのピストン間に位相差をつけることでサイクルは実現する。一方、著者らは 1 つのピストンで動作し、出力を得られるスターリングエンジンの研究を行っている⁽¹⁾。従って、スターリングサイクルの逆サイクルを利用しているスターリング冷凍機についても 1 つのピストンで冷却が可能と考えた。既に一つのピストンで逆スターリングサイクルを実現し、冷却可能なパルス管冷凍機が存在している。

図 1 にパルス管冷凍機の構造を示す。スターリング冷凍機は 2 つのピストンで逆スターリングサイクルを実現しているのに対してパルス管冷凍機は 2 つあるピストンの一方をパルス管領域に形成されるガスピストンに置き換えることにより逆スターリングサイクルを実現している。この場合、ガスピストンを存在させるためのパルス管領域、ガスピストンに位相差をつけるためのタンク、さらにタンクと冷凍機をつなげるためのチューブが必要となる。このため構成要素はスターリング冷凍機に比べ多くなる。またタンク、チューブなどの外部に取り付ける要素が多くなるために小型化が難しい。本研究ではチューブ、タンクから構成される流動部に二重管を用いた冷凍機を提案する。

Figure 1 Pulse tube refrigerator

2 二重管構造の提案

図 2 は二重管を用いた冷凍機の概略図である。二重管はピストン上死点の先に配置した。二重管の先には空間を作り、そこをパルス管領域とした。ピストンで圧縮された作動流体は二重管外側を通りパルス管領域に流入し、内側の管に流れる。外側の管には再生器を配置し、内側の管をタンクとする。これにより通常のパルス管冷凍機と同様の構造となり、冷却が可能と考えた。この時、流れを内側から外側に流すことも可能であるが、まず外側から内側に流す方向を用いて冷却性能が得られるか実験を行う。以降、二重管を利用した冷凍機を二重管型冷凍機と呼称する。二重管型冷凍機のパルス管冷凍機と同様に形状によって変化する。本研究では二重管型冷凍機の最適な形状を決めるための参考としてパルス管冷凍機を製作し、構造に関する基礎実験を行った。

Figure 2 Double tube type refrigerator

3 パルス管冷凍機の基礎実験

3-1 設計仕様

最適設計を行うために、通常のパルス管冷凍機を製作した。図 3 は製作した冷凍機である。ピストン径及びピストロークは $\phi 25 \times 30 \text{ mm}$ 、再生器にはステンレスウールを用い、その空隙率は 0.938 である。動作時の回転数は 500rpm とした。形状に関する実験を行うため、パルス管容量を $0 \sim 8.9 \times 10^3 \text{ mm}^3$ 、チューブ長さを $50 \sim 2000 \text{ mm}$ 、タンクの容量を $0 \sim 500 \times 10^3 \text{ mm}^3$ の範囲で変化させて実験を行った。はじめに動作試験を行い、熱

電対を用いて冷却部内部の温度を測定し、特性を調べた。動作試験時の仕様はパルス管容量 $8.9 \times 10^3 \text{ mm}^3$ 、チューブ長さ 1500mm、タンク容量 $500 \times 10^3 \text{ mm}^3$ である。以降、パルス管冷凍機の実験ではこれを基準としている。図 4 は時間と温度変化の関係を示したものである。運転開始から約 20 分で温度変化がなくなり一定となった。以降の実験において、一定となった温度を平均し到達温度とした。

Figure 3 Over view and schematic view of pulse tube refrigerator

Figure 4 Temperature change at cooling process

3-2 パルス管容量の依存性

パルス管領域の長さを 0, 30, 60, 140mm と変化させることで、パルス管領域の容量を変更し実験を行った。図 5 にパルス管の容量が到達温度に与える影響を示した。パルス管の容量が再生器容量と同等である $3.8 \times 10^3 \text{ mm}^3$ から増大させると到達温度に大きな変化はない。逆に容量を小さくしていったところ到達温度は上昇した。これは、パルス管領域がガスピストンの発生に大きく関わるためと考える。パルス管容量が小さいとガスピストンを発生するための領域が確保することができず到達温度が上昇しており、また一定の容量（今回であれば再生器容量）に近づくと、ガスピストンが形成され、到達温度が低下する。容量をこれ以上に増加してもすでにガスピストンが形成されているため到達温度に変化が少なくなったと考えた。よってパルス管の容量は最低でも再生器の容積と同等以上必要であることが判明した。

Figure 5 Effect of pulse tube volume on achieving temperature

3-3 チューブ長さの依存性

チューブの長さを 50, 250, 500, 1000, 1500, 2000 mm と変更し実験を行った。冷凍機の構造上チューブの最短長さは 0mm ではなく 50mm となっている。図 6 にチューブの長さと到達温度の関係を示す。到達温度はすべて -20°C 近くまで冷却された。チューブはタンクと冷凍機をつなぐ流路の役割であり、本冷凍機では到達温度に長さが依存しないことが判明した。よってチューブの長さはタンクと冷凍機の接続に必要な長さで設定が可能である。

Figure 6 Effect of tube length on achieving temperature

3-4 タンク容量の依存性

タンクの容量を 0, 100, 200, $500 \times 10^3 \text{ mm}^3$ と変更し実験を行った。図 7 はタンクの容量が到達温度に与える影響について示したものである。冷却はすべての状態で確認することができた。しかし、タンクが存在していない状態 ($0 \times 10^3 \text{ mm}^3$) のみ到達温度が -7°C となり、他の条件のものより高い。タンクの役割はガスピストンとなり、ピストンに位相差をつける役割を担っている。逆スターリングサイクルはこの位相差が存在するため実現している。従ってタンクが存在しないことで位相差が得られないため到達温度が上昇したと考える。この結果より少量であってもタンクの設置が必要である。

Figure 7 Effect of tank volume on achieving temperature

4 製作した二重管型冷凍機

4-1 二重管冷凍機の仕様

パルス管冷凍機の基礎実験を元に二重管型冷凍機の形状に関する仕様を決定した。図 8 は製作した二重管型冷凍機とその概略図である。再生器にはパルス管冷凍機と同様にステンレスウールを使用し、空隙率は 0.938、再生器容量は $15.1 \times 10^3 \text{ mm}^3$ となる。パルス管領域の容量を $19.6 \times 10^3 \text{ mm}^3$ とし、再生器容量と比較して十分に大きくした。またチューブの長さを 30 mm、タンク容量を $31 \times 10^3 \text{ mm}^3$ とし、各々パルス管冷凍機での実験結果を反映させている。ピストン径およびストロークはパルス管冷凍機と同様に $\phi 20 \times 30 \text{ mm}$ とした。二重管外側の径はピストン径に合わせ $\phi 25 \text{ mm}$ 、内側の管の内径を $\phi 10 \text{ mm}$ とし、長さはタンクの容量を得るために 40 mm とした。また二重管を固定する方法として図 8 B-C 面のような構造をとした。イチョウ形の穴から作動流体が流れ出ることパルス管領域に向かい、そして中心に設けられた穴より裏に存在する二重管の内側に作動流体が流れ込む構造とした。この構造のためパルス管領域の断面は二重管外側の内径より小さくなると作動流体が流れなくなるため $\phi 25 \text{ mm}$ とした。冷却部はパルス管冷凍機と同様に再生器とパルス管領域の境目になると考えそこに熱電対を設置した。

4-2 動作試験

製作した二重管型冷凍機を動作させて図 8 に示したように設置した熱電対により内部温度を測定した。基礎実験時のパルス管冷凍機と同様に回転数は 500rpm とした。図 9 に二重管型冷凍機における温度と時間の関係を示す。開始時の温度 23°C から変化は見受けられなかった。この他に回転数を 500rpm から 300、900、1200rpm と変更して実験を行ったが、結果は同様であった。また二重管の長さも 40 mm から 20、60、70 mm と変更し、再生器容量を変更したが温度変化を確認できなかった。温度が低下しなかった原因は、パルス管領域にガスピストンが形成されていない、またはチューブの径が細いために二重管内側のタンクに作動流体が流れていないことの 2 点が考えられる。しかしパルス管冷凍機の実験結果より、タンクが存在しなくとも温度低下が

Figure 8 Over view and schematic view of double tube type refrigerator

Figure 9 Temperature change of double tube type refrigerator at cooling process

起きることが確認されている。従って原因はパルス管領域にあると考える。二重管型冷凍機はパルス管冷凍機に比べ、パルス管領域の形状が異なっている。パルス管冷凍機はパルス管領域が $\phi 9 \times 140\text{mm}$ があるが、二重管型冷凍機は $\phi 25 \times 40\text{mm}$ とパルス管冷凍機より太くて短い形状である。パルス管冷凍機でのパルス管領域の実験は容量による影響を考えていたが、形状による影響も関わっていると考える。従って、二重管型冷凍機におけるパルス管領域の形状を現状のものより長くし、パルス管冷凍機に近づけることで冷却が可能ではないかと考え、改良を行った。

5 二重管型冷凍機の改良

冷却が行われない原因がパルス管領域にあると考え、二重管型冷凍機におけるパルス管領域の長さを 40mm から 50、70mm と変更し実験を行った。パルス管領域以外の仕様は図 8 の状態と同様である。図 10 はパルス管領域の長さを変更した際の温度と時間の関係を示したものである。開始温度はすべて 23°C で固定した。パルス管領域の長さを変更しても温度が変化せず冷却性能は得られなかった。70mm の時のみ温度が上昇した。パルス管冷凍機と二重管型冷凍機の構造を照らし合わせると二重管冷凍機では高温部と低温部が近い位置に存在している。これにより高温部で発生される熱量が低温部で冷却される熱量と均衡したため冷却効果が得られなかったと考える。なお、パルス管領域が $\phi 25 \times 70\text{mm}$ の時のみ温度が上昇しているのはパルス管領域の容量が増大したため、冷却するための熱容量が多くなるためことで、均衡が崩れ測定温度が上昇したと考える。ただし温度変化は約 2°C と微小であるため、パルス管領域の長さによる影響は少ないと考えた。

Figure 10 Dependent of pulse tube length for the temperature change process

そこで二重管型冷凍機では、高温部と冷却部の位置が近いことに着目し高温部と冷却部の位置を離すことにした。図 11 に初めに製作した構造と新構造の二重管型冷凍機の概略を示す。図 11(A)は初めに製作した冷凍機の構造であり冷却部と高温部が近い位置にある。これを解消するための構造を図 11(B)に示す。チューブの位置が高温部となるためチューブを冷却部から離す構造とした。その結果タンクの容量は必然的に短くなり、パルス管領域は広がる。しかしこの構造であ

ると二重管内側に高温部が存在してしまうため、熱が冷凍機内部に籠ってしまう可能性がある。そこで二重管型冷凍機の提案時に示したように、作動流体の流れ方向を変えることを考えた。図 11(C)にその概略図を示す。今までは二重管の外側から内側に作動流体が流れていたものを、逆に内側から外側にする。それに伴い、内側の管に再生器を配置し外側をタンクとする。B 案と同様にチューブの位置を変更することで冷却部と高温部の位置を離す。チューブの位置が二重管外側となるため、高温部も二重管外側となる。従って高温部の熱を外に排出しやすい構造となる。

Figure 11 Improvement structure for double tube type refrigerator

6 結論

- ・二重管型構造による冷凍機を設計し、製作を行った。
- ・二重管の長さ、パルス管領域の長さを変更し実験を行ったが、冷却能力は得られなかった。
- ・二重管構造における流動部にて作動流体の流れる方向を変更し、二重管内のチューブの位置を変更することを改良案として、提案しその性能評価を今後の課題とした。

【参考文献】

- (1) 鈴木 裕貴、田中 誠「異なる気孔径を組み合わせた 1 ピストン型スターリングエンジン再生器」 第 12 回スターリングシンポジウム講演論文集 (2009) pp.65-68