

パルス管冷凍機の試作および性能試験

長野工業高等専門学校
機械工学科 石井 隆路

1. はじめに

熱サイクルにおける最大効率、カルノーサイクルで得られることが知られているが、カルノーサイクルを熱機関で実現することは不可能である。しかし、理論的熱効率がカルノーサイクルと同じになるスターリングサイクルが近年注目され、スターリングエンジンが実用化されている。スターリングエンジンは、内燃機関と異なり熱源の種類に関係なく、熱から動力を得られることから、環境にやさしい発電の手段としても注目されている。一方、スターリングエンジンとは逆サイクルの冷凍機は、環境に悪影響を及ぼすフロンなどの冷媒を使用せず極低温が得られることから現在広く研究開発が進められている⁽¹⁾。

本研究では、身近で得られる部品を利用して電気動力から低温源を得る小型のパルス管冷凍機⁽²⁾を試作し、その冷凍性能について検討した。

2. パルス管冷凍機の原理

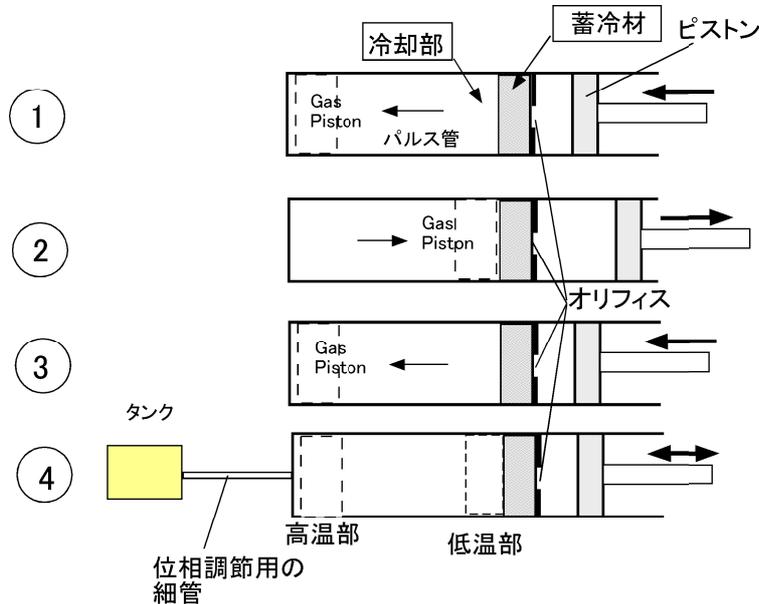


図1 パルス管冷凍機の原理

図1はパルス管冷凍機の原理の模式図である。①のようにピストンを左に移動させるとシリンダー内で圧縮された気体がオリフィスを介してパルス管内で急激に膨張するので、パルス管の右側では冷却部が生じる。次に②のようにピス

トンが右に移動しシリンダー内の気体が膨張すると、それに合わせパルス管内の気体も膨張する。③では①と同様の状態となる。①から③の状態では、パルス管内の気体の圧縮と膨張が繰り返されるに過ぎないため、冷却部が定在することはない。しかし、④のようにパルス管に位相調節用の細管とタンクを接続すると、ピストンが往復運動してもパルス管内の気体に左から右方向に常時移動する圧縮膨張の進行波が形成され、その結果パルス管内に定常的に高温部と低温部が形成されるようになる。これがパルス管冷凍機の原理である。

3. パルス管冷凍機

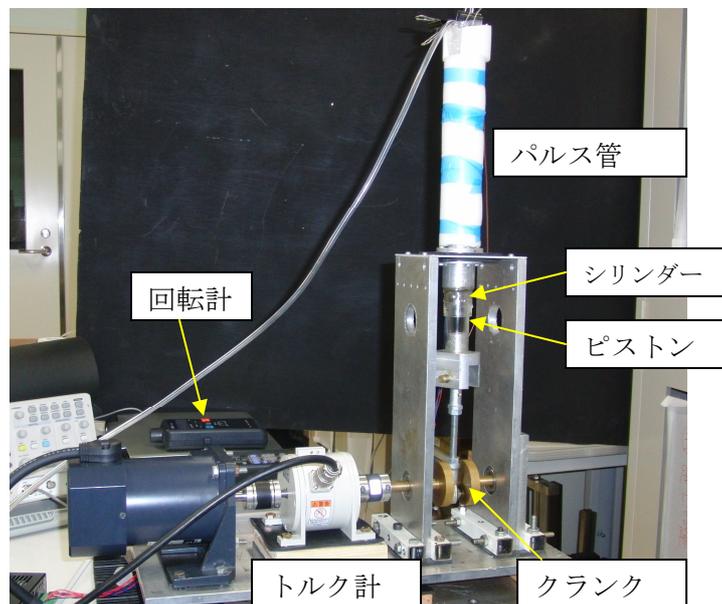


図2 実験装置の全体図

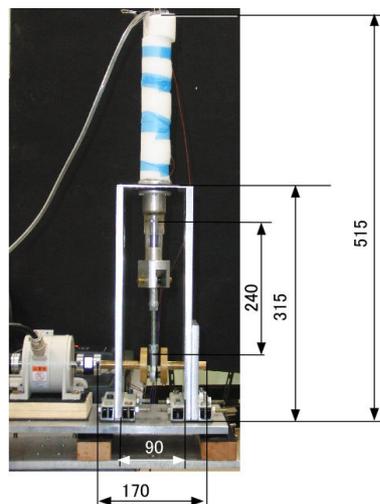


図3 パルス管冷凍機部

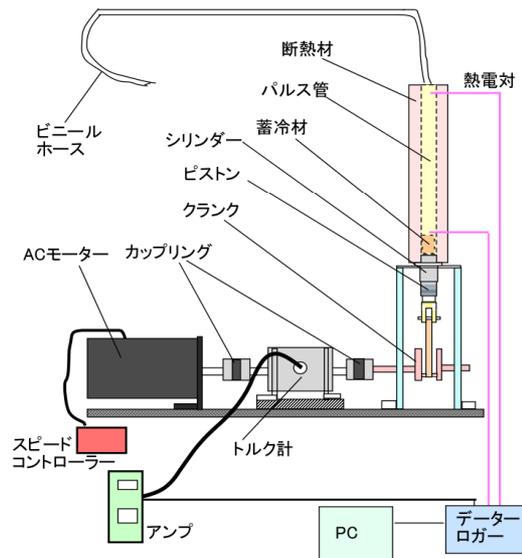


図4 実験装置の計測システム

3.1 実験装置

図2, 図3に製作した実験装置の全体図とパルス管冷凍機部の詳細をそれぞれ示す。また, 図4には実験の計測システムの概略を示す。

ピストンとシリンダー部は, 注射器をカットしたものであり, シリンダーの内径は約 25mm である。またピストンのストロークは 30mm である。蓄冷材 (脱脂綿) を外径 20mm, 内径 10mm, 長さ 200mm のアクリル管の下部に充填した。またアクリル管内の上部と蓄冷材から約 1mm 上部に外径 0.1mm の K 型熱電対を取り付けてあり, アクリル管内の空気の温度測定に用いた。このアクリル管がパルス管と呼ばれるものであり, その上部から内径 1mm, 長さ 20mm のシリコン管につなぎ, そのシリコン管を長さ約 3m, 内径 4mm のビニール管と接続した。パルス管の周りには断熱材を約 5mm の厚さに巻いて, パルス管の熱損失を小さくするようにした。

3.2 実験方法

スピードコントローラを用いて AC モーターの回転数を調節し, その回転数を約 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000rpm の 10 種類になるようにした。モーターのトルクはトルク計の出力をアンプで増幅し, その出力電圧をデータロガーを介してパソコンに取り込み, 電圧とトルクの校正値に基づき周期的なトルク変動をもとめ, その時間平均値から平均トルク T [Nm] を算出した。また, それぞれのモーターの回転数におけるパルス管内の空気の温度変化を熱電対温度計で測定し, データロガーを介しパソコンに取り込んだ。パルス管内の圧縮膨張波の位相の変更は, ビニールホースの途中をクリップでつぶすことで調

節した.

4. 実験結果

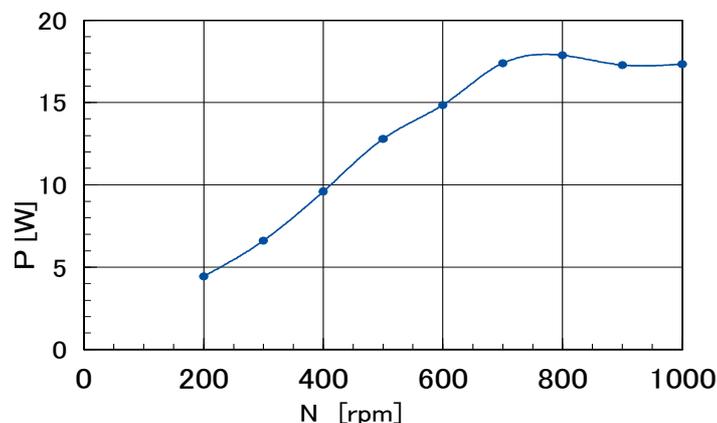


図5 回転数とモーター出力の関係

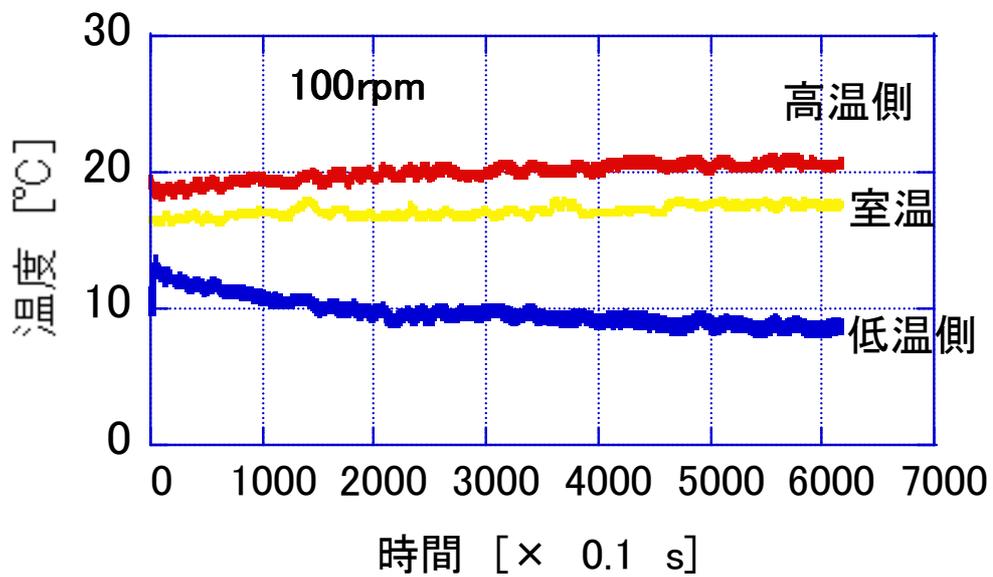
図5にモーターの出力 P と回転数 N の関係を示す. モーターの出力は, 次式で算出した.

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \text{-----(1)}$$

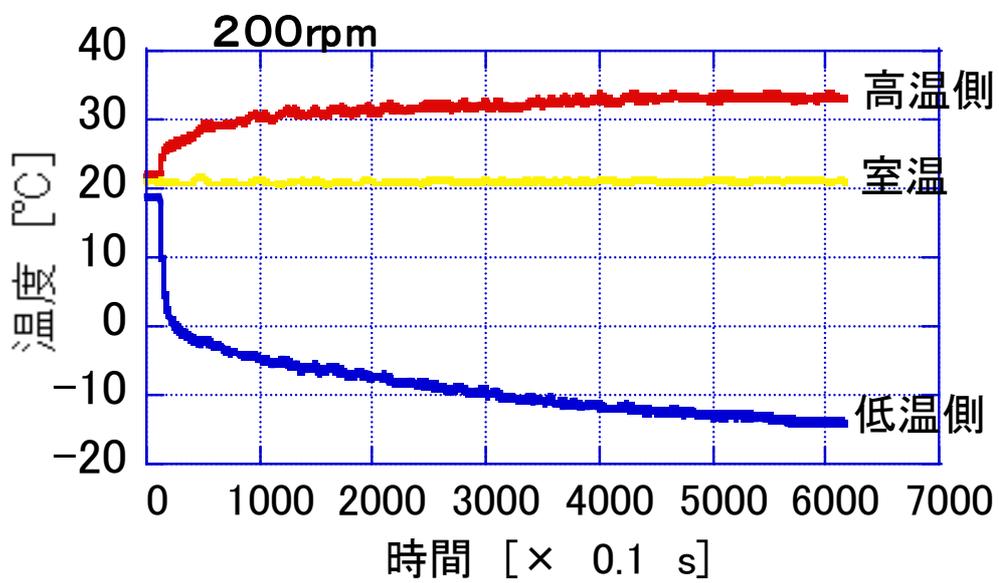
ここで, T [Nm], N [rpm]は, それぞれモーターの平均トルクと回転数である. 100rpm から 700rpm まではほぼ回転数に比例して出力が増大しているが, それ以上の回転数では, 出力の増大は見られずその値はほぼ一定である.

図6(a)~(j)は, モーターの回転数を 100rpm~1000rpm まで 100rpm ずつ変えた場合の, モーター始動時から約 10 分間にわたるパルス管内の上部 (高温側) と下部 (低温側) の温度および室温を測定したものである. いずれの場合も圧縮・膨張波の位相を調節するビニール管の長さは同じである.

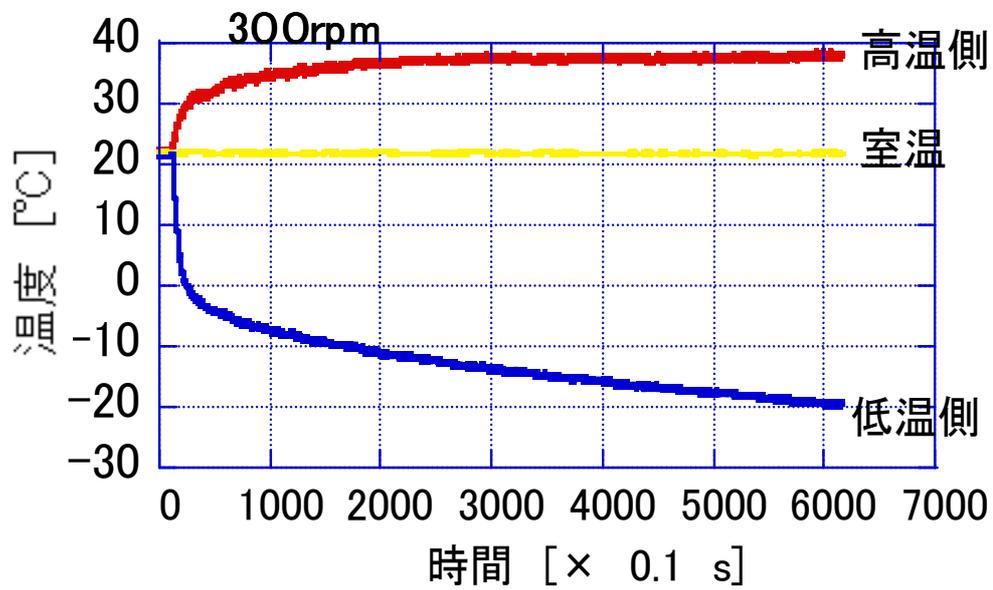
100rpm の場合は低温側温度が氷点下に達していない. また高温側と低温側との温度差も小さい. しかし, 200rpm 以上では低温側温度が氷点下に達している. 各回転数で得られた最低温度を比較すると, 700rpm までは最低温度が徐々に低下し, その値は約 -30°C に達している. しかし, それ以上に回転数を上げても最低温度はほとんど同じである.



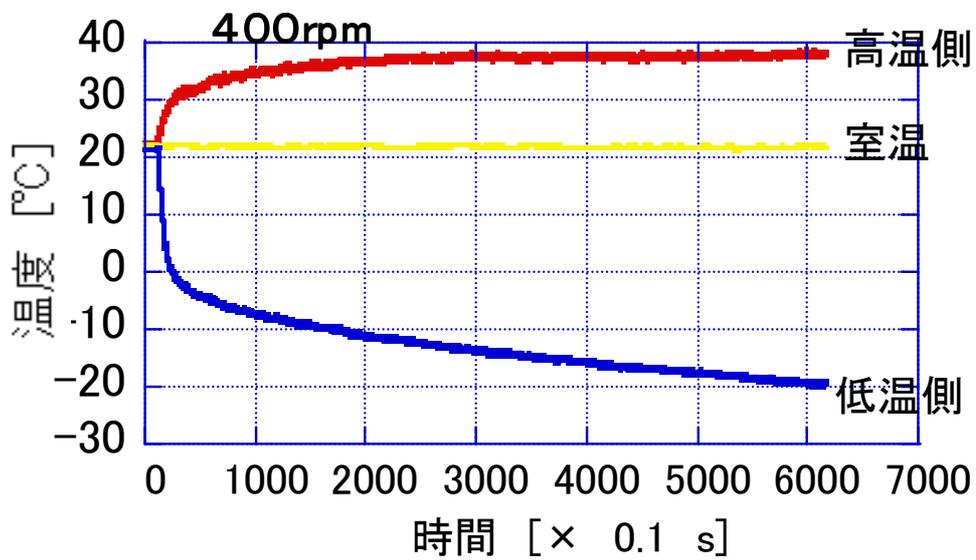
(a) 100rpm



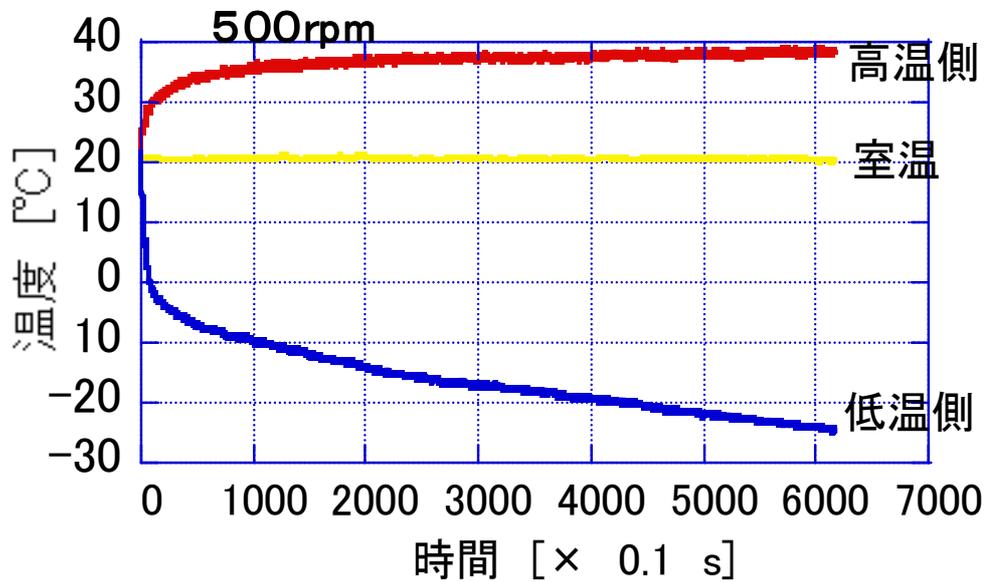
(b) 200rpm



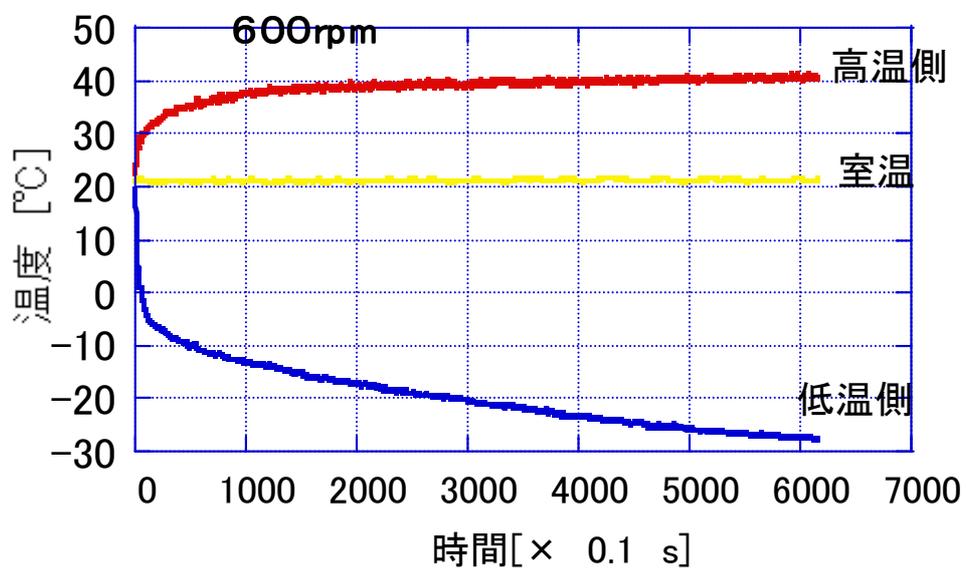
(c) 300rpm



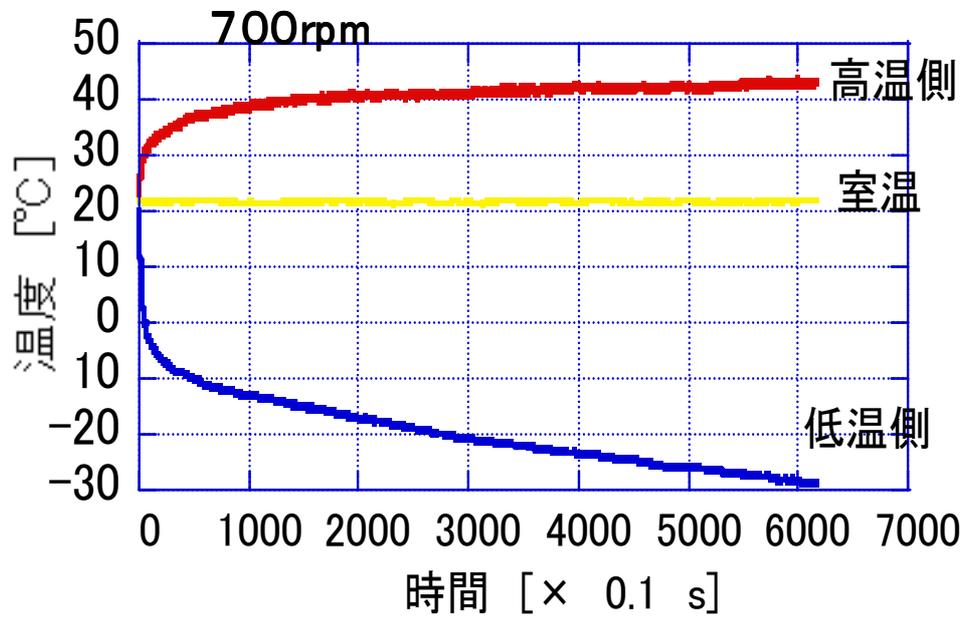
(d) 400rpm



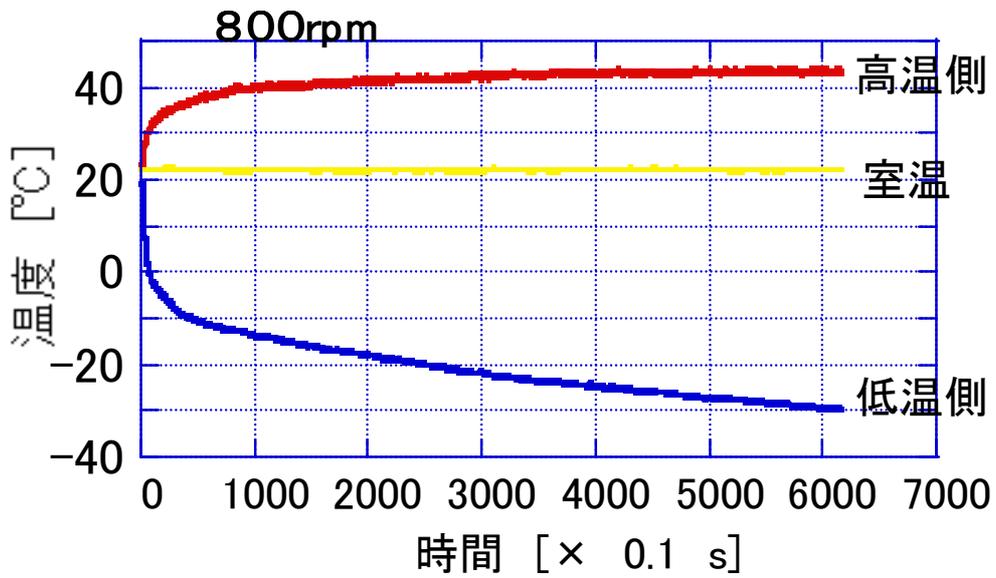
(e) 500rpm



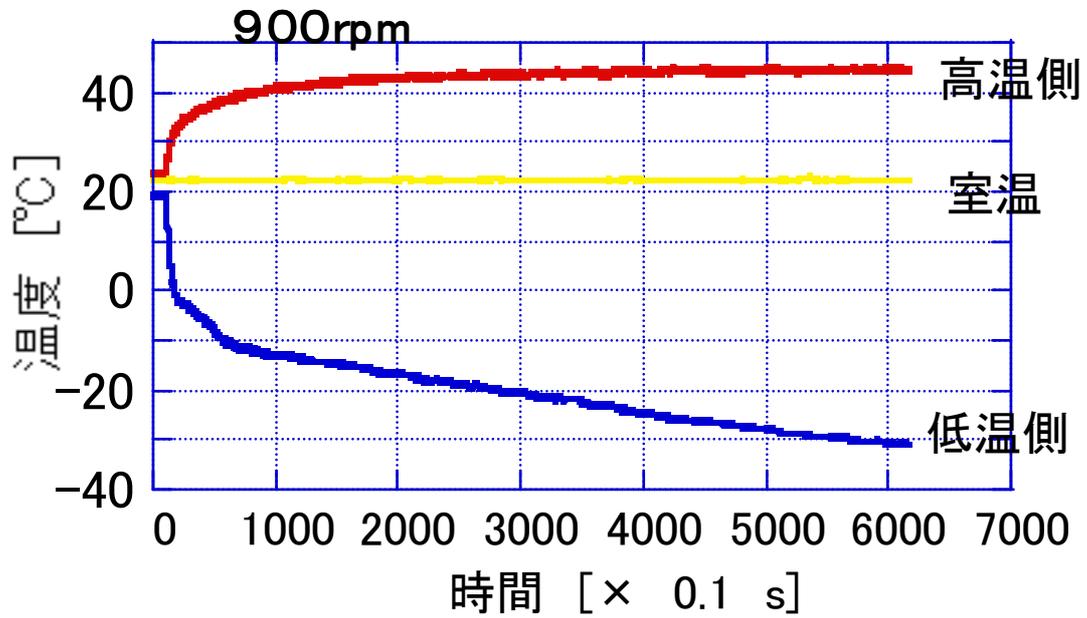
(f) 600rpm



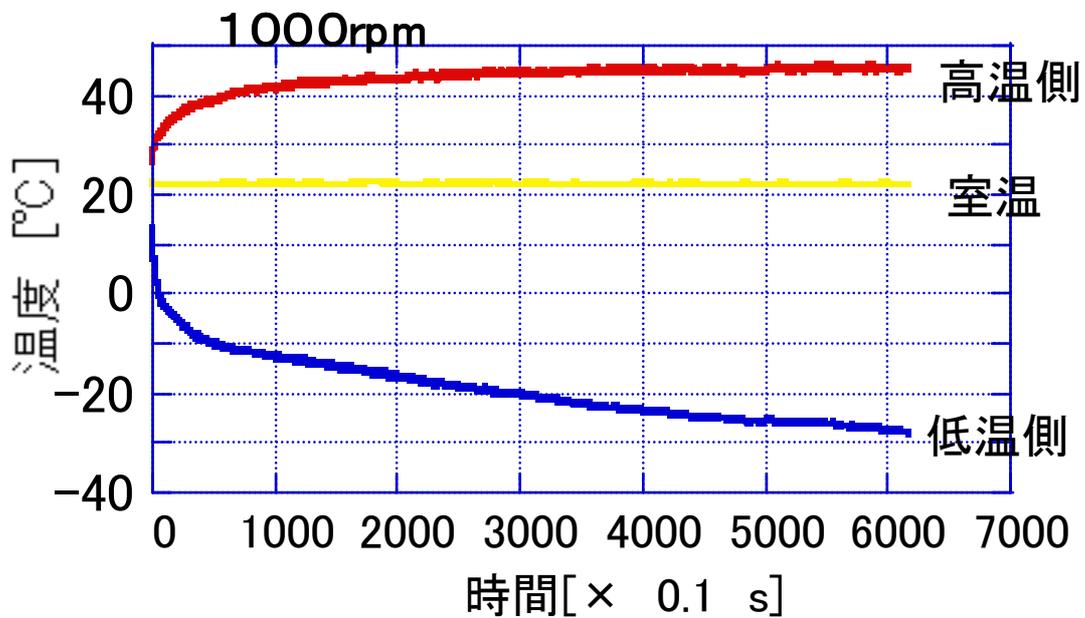
(g) 700rpm



(h) 800rpm



(i) 900rpm



(j) 1000rpm

図6 各回転数におけるパルス管内の温度変化

そこで、モーターの回転数を 900rpm に設定し、位相を変えるためにビニールホースの長さを任意にかえ、冷却性能が最も良いと思われる条件でのパルス管冷凍機内の温度を測定した。その結果を図 7 に示す。モーターを始動してから約 20 分後に最低温度が -40°C に達し、室温との差は約 60°C となり、高温側と低温側との温度差は約 90°C になった。

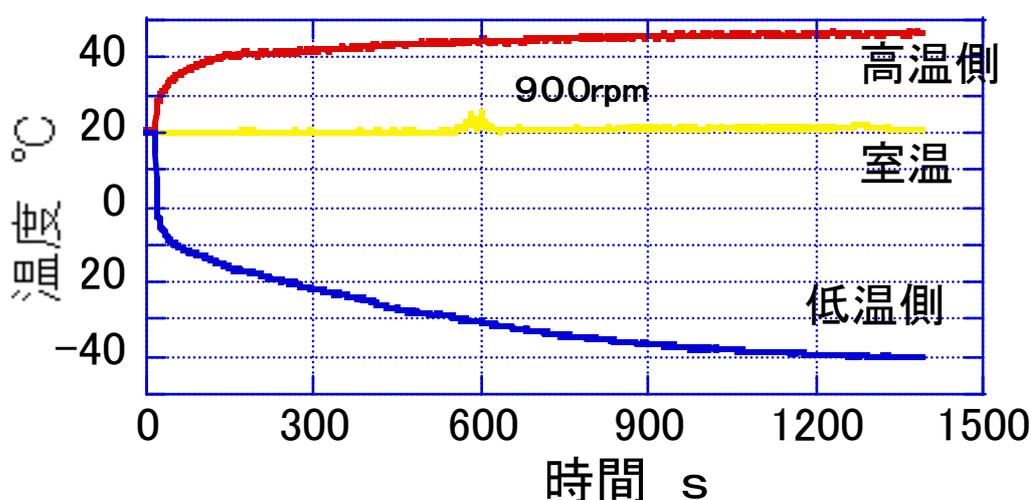


図 7 パルス管内温度の得られた最低温度

5. まとめ

パルス管冷凍機を試作しその冷却性能を検討した。その結果、モーターの回転数が 700rpm 以上では冷却性能に大きな差が見られなかった。その回転数を 900rpm に設定し、ビニール管の長さを変えることで低温側温度が -40°C まで達した。

パルス管冷凍機は簡単な機構で、モーター出力が小さいにもかかわらず、当初の予想をはるかに上回る低温度を作り出すことができた。しかし、冷却性能を決める上での最適条件などの検討については今後の課題として残った。

参考文献

- (1) パルス管エンジン性能に及ぼすパルス管内蓄熱材の効果, 二木洋光, 濱口和洋, 矢崎太一, 平塚善勝, 日本機械学会第 12 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 2007, 219-222.
- (2) Performance Characteristics of an Atmospheric Pulse Tube Refrigerator, 2nd Int. Energy Conversion Engineering Conference, 2004, 16-19.