

4 K Gifford-McMahon 冷凍機の温度振動平滑化に関する研究

藤田 尚樹* 増山 新二**

Investigation of Temperature Smoothing of a 4 K Gifford-McMahon Refrigerator

Naoki Fujita* and Shinji Masuyama**

Abstract

The purpose of this study is to smooth temperature oscillation of a 4 K Gifford-McMahon (G-M) refrigerator. A cold-head of G-M refrigerators have temperature oscillation because of reciprocating of a displacer. In particular, the phenomenon becomes large below 15 K level. The reason is that specific heat of regenerator materials generally decrease with decreasing temperature. The tested two-stage G-M refrigerator has temperature oscillation of 0.33 K (peak to peak value) at 4 K (middle value of temperature oscillation). To smooth temperature oscillation of a cold-stage, we carry out by a simple method: Sandwiching a suitable material between a cold-stage and a cold-head allows smoothing temperature oscillation at the cold stage. In this research, a stainless plate is sandwiched. When using a stainless steel plate of 2 mm thickness, temperature oscillation of the cold-stage is reduced to 0.06 K at 4 K. The result is in good agreement with the calculated value.

Key words: 4K G-M refrigerator, Temperature oscillation, Temperature smoothing

1. 緒言

本研究に用いる Gifford-McMahon (GM) 冷凍機は 1960 年代後半から 70 年代にかけて、宇宙通信の地上局に設置されたパラメトリック増幅器の冷却として世界各地で数多く利用された。その後は宇宙通信関係では使用されなくなったが、電波望遠鏡のパラメトリック増幅器や FET 増幅器の冷却には現在も使用されている。そのほかの用途としては酸化物超電導体研究のための物性測定装置や超電導 MRI などに使用されている。

GM 冷凍機は、ディスプレイサの往復運動により仕事を行っているため、冷凍温度に温度振動が生じる。この現象は、15K 以下で特に顕著になる。温度振動が存在すると、試料を一定温度に保つことが困難となるため、物性測定などをする際の妨げになる。

そこで本研究では、GM 冷凍機に存在する温度振動を平滑することを目的として、研究を行った。以下に、平滑の方法および実験結果を述べる。

2. GM 冷凍機の概要

1959 年、W. H. Gifford と H. O. McMahon により Gifford-McMahon (GM) 冷凍機が開発[1]された。GM 冷凍機は構造が簡単で信頼性も高いことより、現在最も普及している冷凍機の一つである。

本研究に用いた GM 冷凍機は、圧縮機の消費電力が 1.3kW (60Hz) であり、また圧縮機が空冷タイプであるため、実験・計測が手軽に行えることが特徴である。

図 1 に GM 冷凍機の外観写真、図 2 に GM 冷凍機の概略図を示す。本 GM 冷凍機は二つの冷却ステージを持ち、2 段 GM 冷凍機と呼ばれている。GM 冷凍機の冷凍機本体は、肉薄ステンレスのシリンダ内にディスプレイサが挿入されており、その内部に蓄冷器がセットされている。さらにその内部に冷却温度と大きな関係を持つ蓄冷材が充填されている構造である。冷却ガスはヘリウム(He)が使用される。

冷却サイクルは、次のように行われる。まず圧縮機で He ガスを圧縮し、そのガスは、フレキシブルホース内を通り、冷凍機本体内の膨張部へ送り込まれ、そこで膨張され、蓄冷器内の蓄冷材と熱交換をしながら圧縮機へ戻る。これらの一連のサイクルは、ディスプレイの往復運動と同期して行われるため、冷却温度に温度振動を生じる。本冷凍機は 1.2Hz の周波数で動作する。つまり、1.2Hz でディスプレイが往復運動する。



図 1 . GM 冷凍機の外観写真

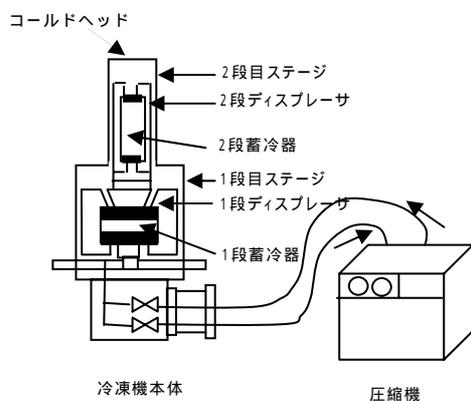


図 2 . GM 冷凍機の概略図

3 . 実験用計測器

実験で使用する計測機器類を図 3 に示す。上からプログラマブル直流電源(YOKOGAWA 7651), 温度コントローラ(LakeShore 331), マルチメータ(KEITHLEY 2000)である。これらはすべて左側のパソコン(PC)へ GP-IB ケーブルを通して接続されており, Microsoft Visual Basic 6.0 で作られた計測用プログラムを使用して制御可能である。

4 . 性能試験結果

4 - 1 冷却試験

コールドヘッドの温度は校正されたシリコンダイオード(LakeShore DT-470)温度計を使用して計測した。そのデータは温度コントローラを介して 10 秒ごとに PC に取り込まれる。冷却試験の結果を図 4 に示す。冷凍機を動作開始後、約 3 時間で室温から 3.2K まで冷却することができることを確認した。



図 3 . 計測機器類

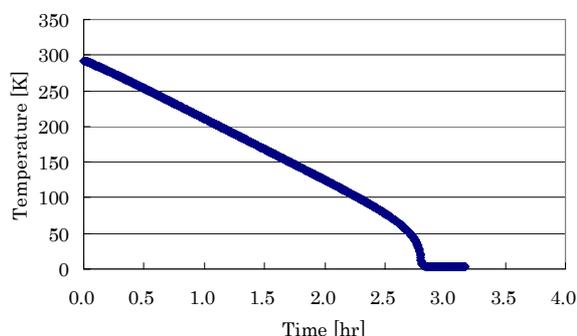


図 4 冷却試験

4 - 2 温度振動測定

温度振動の測定は、瞬時の温度変化を計測するために温度計のデータをマルチメータのバッファリング機能を使用する方法で行った。サンプリング周波数は 126Hz とし, 5 秒間コールドヘッドの温度を計測した。

図 5 に温度振動測定の一例を示す。冷凍機の動作周波数 1.2Hz に同期して、温度振動していることがわかる。この結果より、中心温度が 4.15K のとき、0.34K の温度振動(ピーク・ピーク値)(以下, PP 値とする) を持っていることが確認された。

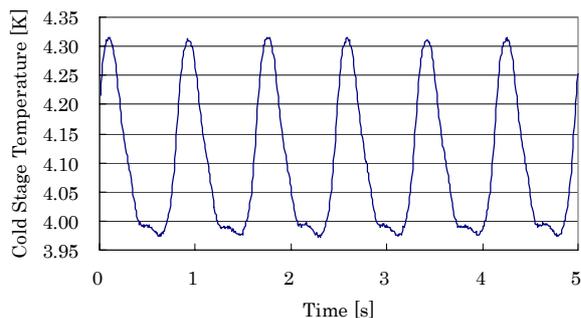


図 5 . 温度振幅測定の一例

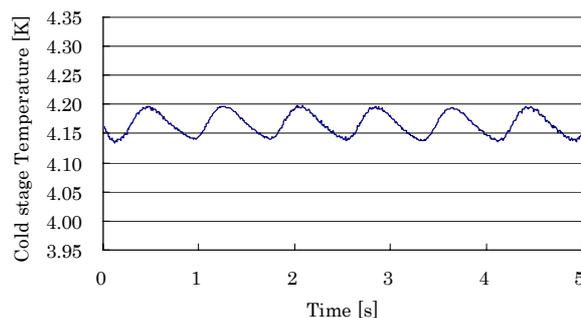


図 7 . 温度振幅測定の一例
(2mm のステンレス板を挟んだ状態)

4 - 3 温度振動平滑化

冷凍機のコールドヘッドとコールドステージ (試料などを冷却するステージ) の間に適当な物質を挟むことで、温度振動を抑えることができるシンプルな方法が報告[2]されている。

本研究では、その方法を採用し、図 6 に示すように、ステンレス板をコールドヘッドとコールドステージの間に挟み、6 本のステンレスボルトで固定した。なお、コールドステージとコールドヘッドは銅製である。

厚さ 2mm のステンレス板を使用して、温度振動の測定を行った結果を図 7 に示す。この結果より中心温度 4.17K のとき、PP 値は 0.07K となった。図 5 と図 7 の結果より、厚さ 2mm のステンレス板を挟むことによって、温度振動が PP 値で 0.27K も減少していることが分かる。コールドステージとコールドヘッドの間に、ステンレス板を挟むという簡単な方法でも、温度振動の平滑化の効果は十分に発揮できることが確認できた。

厚さ 2mm のステンレス板を挟んだときと挟まなかったときの各温度での PP 値を測定した結果を図 8 に示す。横軸はコールドステージ温度 (温度振動の中心温度)、縦軸は PP 値を示す。温度設定は、図 6 に示してあるコールドステージに取り付けられているヒータに、DC 電源から定電圧を加えることにより行った。

この結果より、ステンレス板を挟んだときの PP 値は実験した温度領域において、ほぼ一定値となり、その値は 0.08K 以下となった。それに対して、ステンレス板を挟まないときは、凸状となっており、8.5K 付近で 0.90K 程度の大きな温度振幅を持っている。これは、2 段目蓄冷材の比熱の温度特性に依存した結果であると考えられる。以上の結果から、ステンレス板を挟むことによる温度振動の平滑化の効果がよく現れていることが分かる。

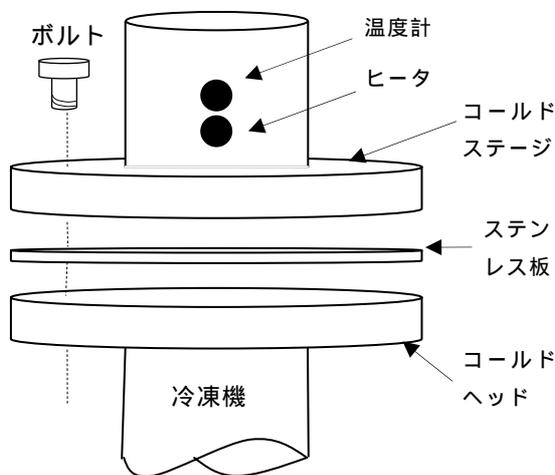


図 6 . 温度振動平滑化方法の概略図

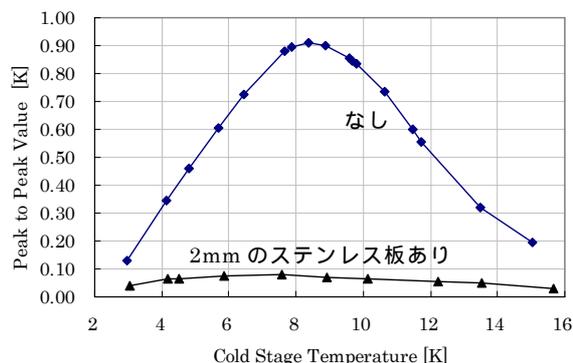


図 8 . 各温度での温度振動

4 - 4 温度振動の計算

図 9 に示すような、半無限固体の端面温度 T_0 が正弦波状に変化するときの、固体内部での温度 T_x は式(1)で表せる[3]。

$$T_x = \Delta T_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_0}}\right) \cos\left(x \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau_0}} - \frac{2}{\tau_0} t\right) \quad (1)$$

ここで、 T_0 [K]は端面温度の振幅、 x [m]は端面からの距離、 α [m²/s]は熱拡散率、 τ_0 [s]は $1/f$ 、 f [Hz]は周波数である。この x がステンレス板の厚さである。

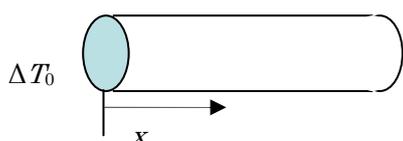


図 9 . 計算モデル

式(1)の τ_0 を 0.1s とし 1s 間分算出したときの計算結果を図 10 に示す。横軸が端面からの距離 x (ステンレス板の厚さ)、縦軸が温度振幅を示す。 x をある一定の値とした場合、図に示される曲線内で温度振動が発生する。端面 ($x=0$) の温度振幅の PP 値を実験結果から得られた 0.33K (中心温度 4K) に設定した。ステンレスの物性値は 4K の値を使用し、一定とした。式(1)からも分かるように、温度振幅の最大値は、端面からの距離 x が長くなるにつれて、指数関数的に減少する。

図 10 には、実験から得られた 2mm のステンレス板を使用したときの温度振幅値もプロットしてある。この結果より、実験結果と計算結果は、よい一致が見られた。さらに温度振動を低減したい場合は、ステンレス板を厚くすればよいことも見て取れる。

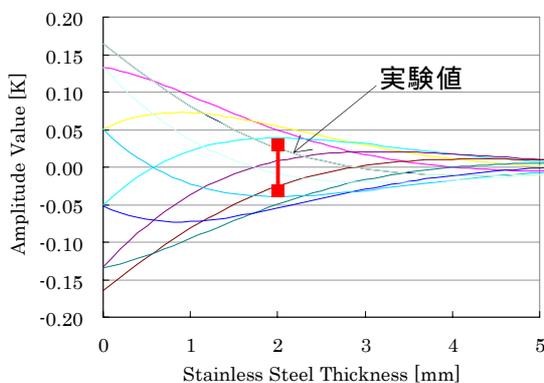


図 10 . 温度振幅の計算結果および実験結果 (中心温度 4K)

4 - 5 冷凍能力試験

コールドステージに取り付けたヒータに定電圧を加え、加えた熱量とそのときの温度を計測し、冷凍能力試験を行った。図 11 に、厚さ 2mm のステンレス板を挟んだときと、挟まないときの冷凍能力試験結果を示す。横軸のコールドステージ温度は、温度振動の中心温度とした。4K 以下と 15K 以上の温度領域では、二つの冷凍能力は、ほぼ同じであるが、4K から 15K 程度の温度領域では、ステンレス板を挟んだ方が、冷凍能力が低い結果となった。これは、銅より比熱の大きなステンレスを挟んでいるため、コールドステージに加えられた熱量が冷凍機で吸収され難いためであると考えられる。また、冷凍能力がほぼ同じ温度領域では、図 8 に示したように、ステンレス板を挟んだ効果あまり見られないことから、冷凍能力に差が現れなかったのではないかと考えられる。したがって、温度振動を平滑化するためにステンレス板を挟むのは有効な手段であるが、冷凍能力が低減する温度領域が存在することに気をつける必要がある。

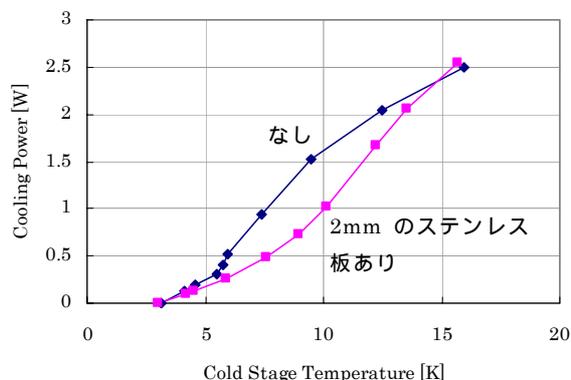


図 11 . 冷凍能力特性

5 . 結言

4K レベルまで冷却可能な GM 冷凍機を使用し、その温度振動を平滑化する研究を行った。コールドステージとコールドヘッドの間にステンレス板を挟むというシンプルな方法でも、温度振動の平滑化の効果は十分に発揮できることを確認できた。さらに温度振動を低減したいときは、ステンレス板を厚くすればよい。したがって、試料の温度を一定に保つ必要がある物性測定などを行う際には、この手法は非常に有効である。

しかしながら、冷凍能力が低減する温度領域が存在することを認識していなければならない。

参考文献

- [1] H. O. McMahon and W. E. Gifford : Adv. Cryog. Eng. 5, (1960) 354
- [2] 増山ら : 第 50 回低温工学・超伝導学会講演概要集, (1993) 66
- [3] S. S. Kutateladze: Fundamentals of Heat Transfer, Academic Press, (1963) 128

