蓄冷材の比熱が 4 K-GM 冷凍機の冷凍能力に及ぼす影響

稲 口 隆*

三菱電機㈱先端技術総合研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

Effects of the Specific Heat of Regenerator Material on Refrigeration Capacity

Takashi INAGUCHI*

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation,
8-1-1Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

1. はじめに

4 K-GM 冷凍機の冷凍能力は蓄冷材の比熱に大きく依存する。このため、さまざまな蓄冷材の開発が行われ、冷凍能力及び効率の向上に努力が払われている¹⁾。

しかしながらこれまでの冷凍機ならびに蓄冷材の開発手法は試行錯誤をベースにした経験主義的なものであり、個々の蓄冷材の冷凍能力特性はつかめても体系的視野に立った観点からの現象の把握はなされていない。(1)十分な比熱の大きさ、(2)比熱分布の影響、(3)異種蓄冷材を積層した場合の影響等は、冷凍機的设计上、また蓄冷材の開発に指針を与えるため、体系的な探査を必要とする項目である。

著者は、4 K-GM 冷凍機の冷凍能力を精度よく計算するため、蓄冷器、膨張空間及び冷却ステージから構成される計算モデルを提案し、その有効性を確認した²⁾。この計算モデルを使用して、蓄冷材の比熱が冷凍能力に及ぼす影響について検討した³⁾のでその概要を紹介する。

2. 計算方法

Fig. 1 に計算モデルを示す。計算モデルは蓄冷器、膨張空間、冷却ステージから構成される。蓄冷器は流体の流路となる蓄冷器無効容積と蓄冷材とから構成される。膨張空間は、その体積が周期的に変動する。以後、蓄冷材と冷却ステージを総称して「壁」と呼ぶことにする。計算にあたり、①流体及び壁を 1 次元的に

Fig. 1 The simulation model.

取り扱う、②流体と壁の流れ方向の熱伝導を無視する、③蓄冷器に外部からの熱負荷はなく断熱とする、④蓄冷材の構成要素（例えば球）の温度は均一とすると仮定した。

基礎方程式は流体の方程式と壁のエネルギー式から構成される。流体の方程式は 1 次元オイラー方程式に流体と壁との間に作用する摩擦力及び伝熱量を付加したものである。膨張空間の体積変動を考慮するため、一般座標系で流体の方程式を記述した。これらの方程式を TVD MacCormack 法で有限差分化し、計算した。

3. 実験結果と計算結果の比較

計算方法を検証するため、比熱の異なる蓄冷材を使用した場合の冷凍能力について計算結果と実験結果を比較した。Fig. 2 は $\text{Ho}_{1.5}\text{Er}_{1.5}\text{Ru}$ を充填した場合と鉛を充填した場合の実験結果と計算結果を比較したものである。どちらの場合もよく一致しており、本計算方法は蓄冷材の比熱が冷凍能力に及ぼす影響を精度よく計算できることがわかる。

*E-mail: inaguchi@ele.crl.melco.co.jp
1999 年 3 月 8 日受理

Fig. 2 Comparison between calculations and experiments regarding refrigeration capacity.

Fig. 3 Effects of specific heat on no-load temperature.

Fig. 4 Effects of specific heat on refrigeration capacity.

4. 比熱の大きさが冷凍能力に及ぼす影響

Fig. 3は蓄冷材の比熱のみを仮想的に変化させて、到達温度に及ぼす影響を計算した結果である。比熱は温度に依存せず一定とした。比熱が $1.5 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ から $0.2 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ までは、到達温度は $2.11\sim 2.30 \text{ K}$ とそれ程変化しないが、 $0.2 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ 以下になると到達温度は顕著に上昇し始める。比熱が $0.063 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ で到達温度は 4.2 K になり、大気圧のヘリウムを液化させるにはこれ以上の比熱が必要となる。さらに比熱が $0.01 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ になると到達温度は 26.9 K になり、高温端の温度(=25 K)より高くなる。すなわち蓄冷材の比熱が $0.01 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ 以下であると冷凍能力がなくなるだけでなく、発熱さえすることがわかる。

Fig. 4は比熱が冷凍能力に及ぼす影響を計算した結果である。比熱が大きいほど温度に対する冷凍能力の勾配が急になる。比熱が $0.05\sim 0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ までは比熱の増加とともに大幅に冷凍能力が向上するが、 $0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ 以上では増加率は鈍る。低温で比熱を大きくするには限度があることを考え合わせると、比熱は $0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ あれば十分ということがいえる。

5. 比熱分布が冷凍能力に及ぼす影響

次に比熱が温度に依存する場合について調べる。

Fig. 5(a), (b)は仮想的に想定した蓄冷材の比熱分布である。どちらも10 Kでの比熱を $0.15 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ 、25 Kでの比熱を $0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ とし、その間は線型な比熱分布にした。これは鉛の比熱を線型近似

Fig. 5 Specific heats of virtual regenerator materials (1) and (2). (a) Virtual regenerator material (1), (b) Virtual regenerator material (2).

したものである。10 K以下では、Fig. 5(a)に示す鋭いピークを持つ比熱分布と、Fig. 5(b)に示す平坦な比熱分布を想定した、以後、Fig. 5(a)及び(b)の比熱分布を有する蓄冷材をそれぞれ仮想蓄冷材(1)及び仮想蓄冷材(2)と呼ぶことにする。

仮想蓄冷材(1)は、ベースとなる比熱 (Fig. 5(a)のBの部分) $0.15 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ の上に、底辺の温度幅が4 Kでピーク時 $0.8 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ の二等辺三角形形状の比熱分布を重ねたもので、この三角形形状の部分を実行移動させ、冷凍能力に及ぼす影響を調べた。

仮想蓄冷材(2)は、2~10 Kまで温度を上昇させるのに要する熱量が仮想蓄冷材(1)の場合と等価 (比熱がピークになる温度が4 K以上の場合) となるよう比熱分布を設定した。この結果10 K以下での比熱は $0.31 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{cm}^3)$ となる。

Fig. 6は冷凍能力の計算結果を示したものである。比熱がピークになる温度 (以後ピーク温度と呼ぶ) が2 K, 3 K及び4 Kの場合を比較すると、2 Kの場

Fig. 6 Refrigeration capacity with virtual regenerator materials (1) and (2).

合、到達温度は最も低いが、温度が4 K以上になると冷凍能力は他のものに比べて小さくなる。ピーク温度が3 Kの場合、4 Kから5 K弱まで最も冷凍能力が大きく、4.2 Kで0.74 Wの冷凍能力がある。ピーク温度が4 Kの場合、到達温度は最も高いが、5 K以上で最も冷凍能力が大きくなる。

Fig. 6 中の実線は仮想蓄冷材(2)における冷凍能力である。この場合、到達温度は2.24 KでFig. 6 中では最も低く、4.2 Kにおける冷凍能力も0.73 Wと比熱のピーク温度が3 Kの場合に次いで大きい。また5 K以上においても比熱のピーク温度が4 Kの場合に次いで大きく、全般にわたってすぐれた冷凍能力特性を示すことがわかる。

6. 異種蓄冷材を積層した場合の影響

実際の蓄冷材の比熱分布は理想的ではないので、比熱分布の異なる蓄冷材を積層して使用することが多い。そこで本節では異種の蓄冷材を積層した場合の影響について記述する。

蓄冷材として蓄冷器の高温側2/3に鉛を充填し、低温側1/3には10 K以下で仮想蓄冷材(2)と同等の比熱分布を有し、10 K以上では0.15 J/(K·cm³)である仮想蓄冷材を充填した。鉛は高温で比熱が大きいが低温では比熱が小さく、この仮想蓄冷材は低温で比熱が大

Fig. 7 Heat transfer from the wall to fluid with the hybrid regenerator material and virtual regenerator material (2).

Fig. 7 は壁から流体への伝熱量を示したものである。ハイブリッド蓄冷材の場合、蓄冷器中央部で伝熱量が小さくなっており、仮想蓄冷材(2)の伝熱量と異なる。これは、ヘリウムの熱物性の影響で蓄冷器の高温側2/3にも10 K以下の領域が多く、低温で比熱が小さい鉛では十分熱交換が行われないからである。一方蓄冷器の低温側1/3はほとんど10 K以下の領域になっており、仮想蓄冷材(3)でも十分対応できる。

7. おわりに

1988年にGM冷凍機単体でヘリウムの液化に成功して以来、早10年が経つ。これまでずっと実験が先行し、解析が後を追っていったという状況であったが、ようやく肩を並べるところまできた。これには数値流体力学の著しい進展に多くを負っている。航空宇宙工学などの分野で既に常識になっている数値実験という概念が冷凍機の分野で根付く日もそう遠くないように思われる。

参考文献

- 1) 橋本巍洲ら：低温工学 31 (1996) 131
- 2) 稲口 隆ら：日本機械学会論文集 (B) 64 (1998) 327
- 3) 稲口 隆ら：日本機械学会論文集 (B) 65 (1999) 315