研究論文

Gifford-McMahon 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に挿入された
ベークライト棒の効果増山 新二^{*1,†}, 平塚 善勝^{*2}Effects of an Inserted Bakelite Rod in the 2nd Stage Regenerator of
a Gifford-McMahon CryocoolerShinji MASUYAMA^{*1,†} and Yoshikatsu HIRATSUKA^{*2}

Synopsis: A novel regenerator structure for a two-stage Gifford-McMahon (GM) cryocooler is introduced in this paper. The structure has a bakelite rod inserted in the co-axial layout of the 2nd stage regenerator in which lead (Pb) spheres are filled as the regenerator material. Inserting the bakelite rod reduces the Pb weight, leading to a decrease in the heat capacity of the regenerator. To clarify the effect of the bakelite rod, two types of conventional GM cryocoolers with power consumption of 1.3 and 7.3 kW, respectively, are tested at the operating frequency of 1.2 Hz. From the experimental results, the lowest attainable temperature of the 2nd stage rises slightly as a result of reducing the Pb weight which is adjusted by the volume of bakelite rod. However, a reduction of Pb weight by approximately 40% does not affect the deterioration of the cooling power at above 9 K. These two GM cryocooler models show almost the same characteristics. Thus, this novel regenerator structure may be applied to most two-stage GM cryocoolers.

Keywords: bakelite rod, regenerator structure, GM cryocooler, cooling power

(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

水素応用や超電導機器などの技術革新が進むにつれて、エネルギー効率の観点から、冷凍機の性能を向上させることは早急に解決しなければならない課題の一つである。特に、手軽に極低温環境を作ることができる蓄冷式小型冷凍機は、各種小型システムの構築や R&D などを進めるための手助けになっているものの、応用機器の実用化を展開する上で冷凍機の効率はとても十分なものとは言えないのが現状である。そこで本論文では、蓄冷器構造に着目し冷凍機の効率改善を目的とし、Gifford-McMahon (GM) 冷凍機

の 2 段目蓄冷器内にベークライトの丸棒を挿入するという新たに考案された蓄冷器構造において、その冷凍性能を実験ならびに数値解析から検証した。

冷凍サイクルにおいて、作動流体であるヘリウムガスが蓄冷器内の同一経路を通る蓄冷式冷凍機では、蓄冷材とヘリウムガスとの熱交換効率が冷凍性能に大きな影響を与える。この効率を向上させるためには、蓄冷器内にヘリウム流の乱れがないこと、また、極低温領域 (30 K 以下) で蓄冷材の比熱が大きいことが望ましい。この作動流体の乱れを抑えるために、蓄冷器内にステンレスメッシュやフェルトマットから構成される整流器を挿入する方式が用いられている。Inaguchi らは粒状蓄冷材が充填された GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内に整流器を挿入し、4.2 K で 29%、また Hao らは同様な構造において 10 K で 40%、冷凍能力が改善されることを報告している¹⁻³⁾。整流器を挿入する方法は簡便であり、性能改善に寄与することから優れた方式の一つである。また、蓄冷材の熱効率改善検討の方法として、蓄冷材の温度特性に応じて数種類の比熱の異なる蓄冷材を二層または三層と層状に配置する方式 (ハイブリッド

Received March 28, 2013

^{*1} 大島商船高等専門学校 電子機械工学科
〒742-2193 山口県大島郡周防大島町大字小松 1091-1
Electronic Mechanical Engineering, Oshima National College of
Maritime Technology, 1091-1 Komatsu, Suo-oshima-cho,
Oshima-gun, Yamaguchi 742-2193, Japan

^{*2} 住友重機械工業株式会社 技術研究所
〒188-8585 東京都西東京市谷戸町 2-1-1
Technology Research Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.,
2-1-1 Yato-cho, Nishitokyo, Tokyo 188-8585, Japan

[†] E-mail: masuyama@oshima-k.ac.jp

蓄冷器)が一般的に用いられている。特に GM 冷凍機や GM 型パルスチューブ冷凍機の 2 段目蓄冷器の低温側に HoCu_2 , Er_3Ni , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$ などの磁性体蓄冷材を充填することにより 4 K レベルの冷却が実現できている。

一方で、磁気比熱を利用する磁性体蓄冷材では、その転移温度付近では冷凍性能改善に大きく寄与するものの、それ以外では、大幅な能力低下を招く可能性がある。これは、磁性体は一般的に転移温度以外では比熱が小さくなり、その状態でヘリウムガスと熱交換するためである。そこで Masuyama らは、2 種類の蓄冷材を同軸上に配置する「同軸配置構造」を提案した^{4,5)}。この構造では、蓄冷器内のヘリウムガスが軸方向で二分されて、それぞれの蓄冷材と熱交換を行うため、見かけ上 2 種類の蓄冷材の比熱特性を利用することを図っている。

本論文における蓄冷器構造は、同軸配置構造から派生された提案で、アスペクト比の異なるベークライト棒を蓄冷器内にダミー部材として挿入することにより、等価的に蓄冷器形状を変えることが可能となる。その形状の違いによる冷凍性能を調査することは、今後の冷凍機開発の点で重要な役割を果たすものと考えている。本構造では、蓄冷器内に挿入されるベークライト棒の体積分だけ蓄冷材分量が減るため、熱容量の減少につながると予測されるが、蓄冷材熱容量の減少は必ずしも冷凍能力の低下結びつかないことも本論文により明らかにされる。以下に、蓄冷器構造、入力電力が異なる 2 台の GM 冷凍機を使用した実験結果、ならびに実験結果を解析するために行われた数値解析結果を述べる。

2. GM 冷凍機と蓄冷器構造

2 段 GM 冷凍機の概略図を Fig. 1 に示す。温度計測のために各冷却ステージにシリコン (Si) ダイオード温度計が、2 段目ステージの冷凍能力測定のために電気ヒータが取り付けられている。また、輻射熱低減のため、2 段目ス

Fig. 1 Schematic drawing of the two-stage GM cryocooler.

テージとシリンダーは 1 段目ステージに固定された輻射シールドで覆われている。本研究には、入力電力が異なる 2 台の GM 冷凍機が使用された。1 台目は、コールドヘッド RDK-101D (SHI), 圧縮機 CNA-11 (SHI), 電気入力は 1.3 kW であり、以後「GM-1」と記す。2 台目は、コールドヘッド RDK-408D2 (SHI), 圧縮機 C-300G (SUZUKI-SHOKAN), 電気入力 7.3 kW であり、以後「GM-2」と記す。いずれも運転周波数 1.2 Hz 一定で動作される。なお、ヘリウムガスの初期封入圧力は、GM-1 が 2.0 MPa, GM-2 が 1.6 MPa である。

2 段目蓄冷器の蓄冷材充填部の概略図を Fig. 2 に示す。充填部の種類は以下のものを用意した。

- (a) : 通常の充填構造「Normal タイプ」
- (b) : ベークライト棒を低温端から高温端まで挿入「Bake タイプ」
- (c) : ベークライト棒を低温側半分には挿入「Bake C タイプ」(蓄冷材が占める空間分布が長さ方向で異なる)

ベークライト棒は、ヘリウム流の対称性を損なわないように蓄冷器の同軸的な配置に挿入される。その周りには蓄冷材として、粒径 0.212 ~ 0.3 mm の鉛 (Pb) が使用されている。なお、Normal と Bake C タイプの中間部には、フェルト、またはステンレスメッシュから成るセパレータが挿入されている。これは、Back C タイプにおいて、ベークライト棒を固定するためであると同時に、今後、低温側に磁性体蓄冷材を充填し性能評価することを考慮しているためである。実験条件を合わせるために Normal タイプにも施工してあり、中間部にセパレータを挿入することで、数%の冷凍能力向上が確認されている。これは、先に述べた作動流体の乱れがセパレータにより抑制されているためであると考えられる。

Fig. 2 Three types of 2nd stage regenerator structures: (a) Normal type, (b) Bake type, and (c) Bake C type.

Table 1 Specifications of the GM model, the bakelite rod, and the reduction rate of Pb weight

GM model	Regenerator type	Bakelite diameter (mm)	Bakelite length (mm)	Reduction rate of Pb weight (%)
GM-1 (1.3kW model)	Bake 1	7	100	19
	Bake 2	10		44
	Bake 3	12		62
	Bake C 1	7	50	8
	Bake C 2	10		21
	Bake C 3	12		27
GM-2 (7.3kW model)	Bake 4	15	140	21
	Bake 5	20		41
	Bake 6	24		61
	Bake C 4	15	70	11
	Bake C 5	20		18
	Bake C 6	24		30

Fig. 3 Photos of the regenerator housing: (a) Normal type, and (b) inserted bakelite rod with a diameter of 12 mm.

GM 冷凍機内に挿入されたベークライト棒の諸元，ならび Normal タイプと比較して，ベークライト棒の挿入により減少した Pb 蓄冷材減少割合を **Table 1** に示す．各冷凍機とも 6 種類のベークライトが挿入され，減少割合がそれぞれ同程度になるように直径を選択した．なお，Normal タイプにおける Pb 充填量は，GM-1 が 117 g，GM-2 が 660 g である．

Fig. 3 は，GM-1 の蓄冷材ハウジング内を低温側から見た Pb 蓄冷材が充填された状態での写真である．(a) は Normal タイプを示し，(b) は直径 12 mm のベークライト棒が挿入されている．

3. 性能試験結果

性能試験は次のように行われた．室温から冷凍機の運転を開始し，各ステージの温度が安定した時を到達温度とし，その後 2 段階目ステージに取り付けてある電気ヒータから定常熱負荷を与えることにより，冷凍能力を測定した．

3.1 冷凍能力結果

GM-1 モデルの冷凍能力試験結果を **Fig. 4** に示す．Normal と Bake タイプ (**Fig. 4 (a)**) において，Normal タイプと比較してベークライト棒の直径が大きくなるにつれて到達温度は徐々に高くなり，最大 1.9 K の差が生じている．しかし，9 K 以上においては，いずれの場合においても冷凍能力にほとんど差が生じていない．つまり，9 K 以

(a) Normal and Bake type of the GM-1 model

(b) Normal and Bake C type of the GM-1 model

Fig. 4 Experimental results of the cooling power of the GM-1 model.

上では蓄冷材を 62%まで減少 (Pb 充填量は 44 g) することが可能である．

Normal と Bake C タイプ (**Fig. 4 (b)**) においては，到達温度は(a)と同様な傾向を示しているものの，7.5 K で冷凍能力の差がなくなり，その後はベークライト棒を挿入した方が，Normal タイプより大きな冷凍能力を発生している．特に，直径が一番大きな Bake C 3 タイプが最も冷凍能力の改善に寄与している．なお，Bake C 2 タイプと同等な諸元の銅棒を挿入したところ，到達温度は最も高い 5.9 K，20 K での冷凍能力は 2.4 W となり Normal タイプと比較して 15%の能力低下となることを確認している．したがって，挿入される棒の物性としては，ベークライト以外にも，高い断熱性を持つものであれば同様な効果が得られると考えている．

GM-2 モデルの冷凍能力試験結果を **Fig. 5** に示す．Bake，Bake C タイプとも到達温度については，GM-1 モデルの結果 (**Fig. 4**) と同様に，ベークライト棒の直径が大

(a) Normal and Bake type of the GM-2 model

(a) GM-1 model

(b) Normal and Bake C type of the GM-2 model

(b) GM-2 model

Fig. 5 Experimental results of the cooling power of the GM-2 model.

Fig. 6 Dependence of the cooling power at 20 K on the reduction rate of Pb weight.

きくなるにつれて高くなっている。その後、Bake 6 タイプを除く 5 つのタイプは 9 K 以上で Normal タイプとほぼ同等な冷凍能力を得ている。つまり、蓄冷材を 41%まで減少 (Pb 充填量は 389 g) しても、冷凍能力には大きな影響を与えていないことが分かる。

3.2 20 K での冷凍能力

Fig. 4, 5 の結果をもとに、20 K での冷凍能力と Pb 蓄冷材減少割合の関係を再プロットした結果を Fig. 6 に示す。Normal タイプでの蓄冷材分量を基準 (減少割合は 0%) とし、数値が大きくなるにつれて直径の大きなベークライト棒が挿入されていることを表している。

GM-1 モデル (Fig. 6 (a)) の Bake タイプでは、Pb 蓄冷材を減少させても、その能力にはほとんど影響がなく、Normal タイプの能力と比較して 3%以内の低下で収まっている。一方、Bake C タイプでは、Normal タイプよりも、ベークライト棒を挿入し蓄冷材を減少させた方が、能力の

改善が見られている。最も効果が大きいのは蓄冷材を 27%減少させた時で、冷凍能力が 21%も改善している。

GM-2 モデル (Fig. 6 (b)) の Bake タイプでは、蓄冷材減少割合が 41%までは、能力低下が 1%程度に抑えられているものの、その後は多少の能力低下が見られる。Bake C タイプでは、GM-1 で得られたような Normal タイプの能力を超えることはなかったものの、Pb 減少割合が 20%付近で、Bake C タイプの方が Bake タイプより大きな能力を得ている。Fig. 4, 5 に示すように、Normal タイプとベークライト棒を挿入した場合の冷凍能力が同等となる 9 K から 20 K 間の温度領域においても同様な結果となることが予測できる。

冷凍能力試験結果より、ベークライト棒を挿入することで蓄冷器形状が変化し、蓄冷材分量が減少するものの、それは到達温度以外には大きな影響を与えず、さらに 9 K 以上では蓄冷材分量の減少が、GM-1 モデルでは 62%まで、

GM-2 モデルでは 41%まで、冷凍能力の低下として現れない結果が得られた。また、Normal タイプを上回る冷凍機とベークライト棒の組み合わせが存在することも明らかになった。つまり、冷却対象温度や冷凍機の大きさにおいて、蓄冷器形状や、蓄冷器内に充填される蓄冷材の空間分布を変化させることにより、冷凍機の効率が改善することが確認された。今後は、磁性体蓄冷材の使用も含めた他種の蓄冷材を充填した場合の本蓄冷器構造の有効性も確認する必要があると考えている。

4. 数値解析

本来、20 K 近傍において蓄冷材の量を減らすことは、熱容量の減少から熱的な損失を増加させ冷凍能力の低下につながると思われる。しかし、前節の性能試験結果より、ベークライトを挿入し大きく蓄冷材を減らしたにも関わらず冷凍能力の低下は見られない。そこで、本試験結果を分析するために冷凍機の数値解析を行った。計算に使用した基礎方程式は、1 次元の作動流体に関する連続の式 (式(1))、運動量保存式 (式(2))、エネルギー保存式 (式(3))、ならびに蓄冷材のエネルギー保存式 (式(4)) を用いた⁶⁾。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + P) = -\frac{f}{2D} \rho u |u| \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u E + u P) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eq} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q - w \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_V T_m) + q = 0 \quad (4)$$

ここで、 x は座標、 ρ は密度、 u は流速、 P は圧力、 D は等価直径、 f は摩擦係数、 E は総エネルギー、 λ_{eq} は蓄冷材の等価熱伝導率、 T はガス温度、 T_m は蓄冷器および壁温度、 q は蓄冷器および壁との熱交換量、 w は外部 PV

仕事、 C_V は蓄冷器比熱である。総エネルギー E は式(5)から求める。

$$E = e + \frac{1}{2} u^2 \quad (5)$$

ここで、 e は内部エネルギーである。また温度 T については式(6)から、圧力 P については式(7)から求める。

$$T = T(\rho, e) \quad (6)$$

$$P = P(\rho, T) \quad (7)$$

以上の基礎方程式を連立して解き、各空間における仕事流、エンタルピー流、冷凍能力を求めた。なお、輻射熱損失、シャトル熱損失およびポンピング損失は、計算結果の冷凍能力から差し引かれてある。また、数値計算モデルは膨張機の 2 段目蓄冷器内にベークライト棒を同軸的に配置した構造 (Fig. 2) であり、実験に使用した GM-1 モデル実機の諸元が採用されている。

GM-1 モデルの Bake ならびに Bake C タイプについて計算から得られた 2 段目膨張空間内圧力の高低圧差と、圧力バルブを通過するヘリウム平均流量の関係を Fig. 7 に、2 段目膨張空間での仕事流とエンタルピー流を Fig. 8 に示

Fig. 8 Numerical analysis of work flow and enthalpy flow at the 2nd expansion volume of the GM-1 model as a function of the reduction rate of Pb weight.

Fig. 7 Numerical analysis of the pressure difference at the 2nd expansion volume and the average helium flow rate of the GM-1 model as a function of the reduction rate of Pb weight.

Fig. 9 Numerical analysis of the cooling power at 20 K of the GM-1 model as a function of the reduction rate of Pb weight.

す。これらの結果から、Pb 減少割合が大きくなるにつれて、2 段目膨張空間内の高低圧差が大きくなり（低圧側の圧力低下）、バルブを通過するヘリウム流量が減少（Fig. 7）し、これらの増減を受けて、2 段目膨張空間の仕事流は増加、エンタルピー流がわずかながら減少（Fig. 8）していることが分かる。Fig. 9 は、20 K での冷凍能力計算結果を示す。Pb 減少割合が大きくなるにつれて、20 K での冷凍能力が向上している。その大きさは、実験した Bake C タイプの Pb 減少割合の最大値である 27% まで、Bake C タイプの方が Bake タイプより若干大きい。

以上の計算結果から、ベークライト棒の挿入は、蓄冷材の熱容量を減少させるネガティブな要素をとともうが、冷凍機内へ流入するヘリウム流量が減少するためエンタルピー流の大きな変化もなく、さらに圧力損失低減による 2 段目膨張空間の仕事流の増加というポジティブな要素が加わり、結果として冷凍能力を向上させる効果が生じているものと考えられる。また、数値解析結果（Fig. 9）と実験結果（Fig. 6 (a)）を比較すると、定量的な差があるものの数値解析結果は本蓄冷器構造の実験結果を定性的に再現することができていると考えられる。

数値解析により、本蓄冷器構造の効果を定性的に把握できるようになった。今後この解析を進めることで、冷却対象温度領域における冷凍機の効率改善に適した蓄冷器幾何形状についての検討が必要であると考えている。

5. まとめ

GM 冷凍機の 2 段目蓄冷器内にベークライト棒をダミー部材として挿入するという新たな蓄冷器構造の性能試験が、入力電力の異なる 2 台の GM 冷凍機について行われた。ベークライト棒を挿入することで蓄冷器形状が変化するとともに蓄冷材分量が減少するため、エンタルピー流が増加し、蓄冷器効率ならびに冷凍能力が大幅に低下することが予測された。しかしながら、実験結果から、ベークライト棒の挿入は到達温度を若干上げてしまうものの、9 K 以上では Normal タイプとほぼ同等の性能を発揮することが可能であり、さらに Normal 以上の冷凍能力を発揮する冷凍機と蓄冷器形状の組み合わせが存在することも確認された。また数値解析から、本蓄冷器構造はエンタルピー流の大きな変化をとともわず、圧力損失が低減し 2 段目膨張空間の仕事流を増加させる効果を持っていることが見積もられた。

本研究で得られた成果は、冷却対象温度や冷凍機の大きさにおいて、蓄冷器形状や、蓄冷器内に充填される蓄冷材の空間分布を変化させることにより、冷凍機効率の改善につながることが確認されたことである。さらに、これらの研究を詳細に進めることが今後の冷凍機開発のために重要であると言える。また、入力電力が異なる 2 台の GM 冷凍機について特性を調査した結果、同様な効果が得られて

いることから、本蓄冷器構造は多くの 2 段 GM 冷凍機に適応可能であることを示唆している。

今後の課題としては、本蓄冷器構造における磁性体蓄冷材の使用も含めた他種の蓄冷材での効果、ならびに蓄冷器幾何形状の最適化問題を調査する必要があると考えている。

本研究は、科学研究費助成事業（基盤研究 (C) 24561064）の一部により実施された。

参 考 文 献

- 1) T. Inaguchi, M. Nagao, K. Kouki and H. Yoshimura: "Development of 2W class 4K Gifford-McMahon cycle," Proceedings of ICEC16/ICMC1997 (1997) 335-338
- 2) X.H. Hao and Y.L. Ju: "Experimental study on the low temperature packed with rectification mesh," Cryogenics **50** (2010) 390-396
- 3) X.H. Hao and Y.L. Ju: "Experimental investigations and improvements for the 10 K G-M refrigerator," Adv. Cryog. Eng. **57** (2012) 683-689
- 4) S. Masuyama, K. Matsui, K. Tamura and T. Numazawa: "Cooling performance of a GM cryocooler by co-axial layout of regenerator materials," Abstracts of CSSJ Conference **85** (2011) 149
増山新二, 松井康平, 田村昂大, 沼澤健則: 「蓄冷材の同軸配置による GM 冷凍機の冷凍性能」, 第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 (2011) 149
- 5) S. Masuyama, K. Matsui, K. Tamura and T. Numazawa: "Attractive performance of a Gifford-McMahon cryocooler by co-axial layout of regenerator materials," Cryogenics **52** (2012) 695-698
- 6) Y. Hiratsuka and T. Sato: "Investigation on the regenerator characteristics of 4K-GM cryocooler—Influence of 2nd regenerator material Pb diameter—," Abstracts of Stirling Cycle Symposium **10** (2006) 87-88
平塚善勝, 佐藤敏美: 「4K-GM 冷凍機蓄冷器の検討—2 段蓄冷材の鉛粒径の影響—」, 第 10 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集 (2006) 87-88

増 山 新 二

1969 年 2 月 11 日生。1991 年日本大学理工学部電子工学科卒業。1996 年同大学院理工学研究科博士後期課程（電子工学専攻）修了。1996 年日本大学理工学部助手。1997 年大島商船高等専門学校電子機械工学科助手。翌年講師，2005 年助教授，現在准教授。2003 年 5 月から 10 ヶ月間，韓国機械研究院（KIMM）在外研究員。主に小型冷凍機の研究に従事。低温工学・超電導学会会員。博士（工学）。

平 塚 善 勝 1963 年 5 月 2 日生。1989 年明治大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。2004 年大阪市立大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。1989 年ダイキン工業(株)に勤務。現在住友重機械工業(株)に勤務し，主に小型極低温冷凍機の研究開発に従事。低温工学・超電導学会，日本機械学会会員。博士（工学）。