

家庭用スターリング冷凍機

大 高 敏 男*

Stirling Cycle Machine as a Household Refrigerator

Toshio OTAKA*

Abstract: The greenhouse effect by carbon dioxide issue would make better recognizing the importance of efficient use of energy in terms of high energy conservation measures. Accordingly, attention is drawn to the Stirling refrigerator, which is a perfect Freon free refrigerator. The Stirling cycle has the highest theoretical cycle efficiency corresponding to the value of the Carnot cycle among the proposed thermodynamic cycles. Stirling refrigerators as household refrigerators with high efficiency and high cooling capacity have received limited studies. The authors have designed and developed a 100 W class Stirling refrigerator for household use. This paper presents some thermodynamic characteristics shown by PV analysis and experiments on a Stirling refrigerator with a hybrid regenerator made of copper matrixes and nylon matrixes. And we performed analysis and evaluation experiments using the 100 W capacity prototype refrigerator using the hybrid regenerator, with the aim of applying Stirling refrigerators to household use. Moreover, this paper proposes the small-size Stirling refrigerator with an active-type regenerator.

Key Words: Stirling Cycle Refrigerator, Regenerator, Matrix, Nylon, Urethane, Household Machine

1. 緒 論

近年、地球温暖化に代表される地球的規模の環境破壊が問題となっている。また、国際的な合意の元に採択された京都議定書が2005年2月に発効され、地球温暖化に関与しない冷媒を用いる冷凍・空調機器の開発が急務となっている。

スターリング冷凍機は、温暖化に関与しない水素、ヘリウム、窒素などを作動ガスとして利用する冷凍機で、理論効率がカルノー効率と等しくなることから実機での高効率が期待される。そのため地球温暖化問題に対応した冷凍機として注目されている。

著者らはこれまでに、家庭用冷凍機としてスターリング冷凍機原型機(以後、原型機という)を設計・試作し、従来から広く用いられている蒸気圧縮式冷凍機に比べて、同等以上の性能を有していることを冷凍機単体の性能評価実験と解析によって明らかにした⁽¹⁾⁽²⁾。また、家庭用冷凍機として実用化の検討を行うために密閉型のオイル潤滑式機構部を用いた2号原型機⁽³⁾、3号原型機⁽⁴⁾を設計・試作して性能評価を行っている。また、温暖化の抑制のためには、さらに高効率化を図り、消費電力を減らす必要がある。著者らは、高効率化を図る施策とし

て、スターリング冷凍機用再生器の蓄熱材としてナイロンメッシュと銅メッシュを混合して用いるハイブリッド再生器を提案した⁽⁵⁾。そして、ハイブリッド再生器を搭載したスターリング冷凍機は機械損失の低減と冷凍能力の向上に効果があることを明らかにした。さらに、ウレタンフォームのように伸縮性の富む材料を再生器の蓄熱材に利用し、ピストンの動作に同期して蓄熱材の密度に粗密を付与する能動制御型再生器⁽⁷⁾を考案し、性能向上に効果があることを明らかにした。

また、最近では実用化のために、生産性と耐久性を設計上考慮したオイル潤滑式クランク機構を駆動機構として搭載したスターリング冷凍機を設計・試作して性能評価を進めている⁽⁸⁾。

本稿では、これまでの性能向上施策を織り込んだ家庭用スターリング冷凍機の基本動作特性を整理し、そこから導き出される課題とその解決の方向性を示すことにより、実用化の可能性を明らかにすることを試みる。

2. 家庭用冷凍機

一般的に家庭内で用いられる冷蔵庫に搭載される冷凍機を家庭用冷凍機と称する。家庭用冷凍機の動作温度範囲は、概ね253 K~318 Kで、ほとんどの冷蔵庫に蒸気圧縮式冷凍サイクル(逆ランキンサイクル)を用いた蒸気圧縮式冷凍機が搭載されている。図1に蒸気圧縮式冷凍サイクルのP-h線図を示す。圧縮機により①から

* 国士舘大学理工学部理工学科機械工学系
Kokushikan University, Mechanical Engineering Course,
School of Science & Engineering

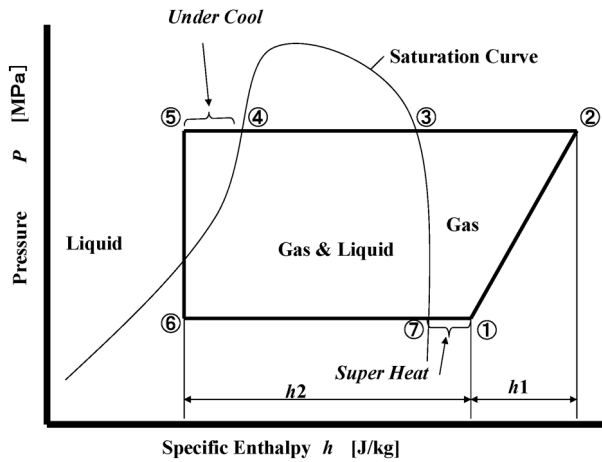


Fig. 1 P-h diagrams

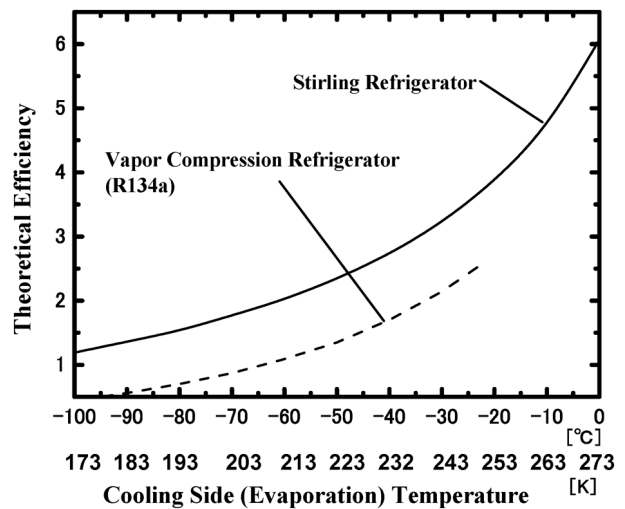


Fig. 2 Theoretical Efficiency

②へ昇圧された冷媒ガスは凝縮器により冷却され液化して⑤の状態になる。膨張弁により⑥まで減圧したのちに蒸発器によって吸熱し①の状態に戻る。冷蔵庫では、この蒸発器の吸熱作用を庫内冷却に用いている。したがって、冷媒の圧力によって蒸発温度が定まるので、庫内の冷却温度も一義的に定まるのが特徴である。家庭用冷凍機の設計条件は、我が国の夏季の最高気温を考え318 K 雰囲気凝縮器が機能するようにする。一方、圧縮機の入口の冷媒の圧力は製品の信頼性の観点から大気圧以下にならないように設計する。したがって、蒸発器の圧力も大気圧以下にならないように定める。このような条件下で良好に機能する熱物性を有する冷媒として、R134a と呼ばれる HFCs (Hydro-fluorocarbons) 系冷媒が広く用いられている。しかし、R134a 冷媒は、地球温暖化に寄与する人工化合物であるため、最近では自然界に元々存在するため温暖化の影響を考えなくても良い炭化水素系冷媒を用いる冷凍機が増えてきた。しかし、炭化水素系冷媒は爆発性があるため、製品や製造工程における安全性の確保が課題となっている。

図2に蒸気圧縮式冷凍機の理論効率をスターリング冷凍機の理論効率と比較して示した。ここで、蒸気圧縮式冷凍機の理論効率は加熱度 5 K、過冷却度 0 K としたときのエンタルピ比 ($h2/h1$) として示している。圧縮機の入口圧力は243 K 以下で大気圧以下となるので、それ以下の冷却を実現することは圧縮機の設計が困難になるため難しい。また、233 K 以下になると圧縮比が22以上となり単一の冷凍機では実現が困難になる。一方、スターリング冷凍機は、ガスサイクルであるので運転周波数や封入圧力によって、容易に低温を得ることが可能である。表1に低温側温度250 K の時の理論効率を一例として比較して示した。スターリング冷凍機の方が約1.5倍高くなっており、理論上では既存の冷凍機よりも優れた性能を有していることが示される。

Table 1 Theoretical Efficiency

	Refrigerant	Theoretical Efficiency
Vapor Compression Refrigerator	R134a	2.52
Stirling Refrigerator	Helium	3.66

Temperature Conditions : 318 K/250 K
Super Heat/Under Cool : 5 K/0 K

3. スターリング冷凍機基本動作特性

スターリング冷凍機は、理論上既存の冷凍機に対して優れた性能を有しているが、実機においては機械損失や熱損失が含まれるため、実用化のためにはその動作特性を評価する必要がある。ここでは、基本性能評価を行うことを目的に設計・試作した原型機の緒元と得られた基本動作特性について述べる。

3.1 原型機の仕様と構造

原型機の冷凍能力は、概ね家庭用冷蔵庫を想定して 100 W とした。作動温度領域は233 K~303 K に設定した。これは、家庭用冷凍機の作動温度領域を室温から食品を冷凍するのに必要な温度領域と定義し、原型機ではこれを前記温度範囲に想定したものである。原型機の仕様を表2に示す。作動ガスはヘリウムとした。水素ガスはヘリウムガスや窒素ガスよりも粘性が低く流動損失は小さくなるが、反面分子量が小さいため漏れやすく、また爆発性があるので家庭用冷凍機には採用しにくい。窒素ガスは空気中に大量に存在し、産出国に限られるヘリウムガスよりも入手が容易で利用しやすいが、粘性が高く流動損失は大きい。したがって、ヘリウムガスが原型機における基本的な動作特性の把握に適していると判断したためである。封入圧力は最大で1.0 MPa とし

Table 2 Specifications of Prototype Machine

Cooling capacity	100 W
Cooler wall temperature	233 K
Radiator wall temperature	303 K
Working fluid	Heliume
Width Height Depth	260×320×130 mm
Bore×Stroke	60×20 mm
Mean Ppressure	0.7 MPa (max. 1.0 MPa)
Piston speed	16.7 Hz (max. 25 Hz)
Regenerator matrix	Wire mesh (Cu, #100)

た。一般にスターリング冷凍機では封入圧力が高压であるほど、また運転周波数が高速であるほど出力は増大する。封入圧力に関しては、日本の法規上の問題を考慮して決定した。冷凍機設計における最大運転周波数は25 Hz、通常運転周波数は16.7 Hzとした。これは、原型機で用いているテフロン製ピストンリングの摺動限界速度を考慮して決定した。再生器のマトリックスは作動温度領域で熱的特性が良好な銅材の金網を採用した。作動空間容積やシリンダ直径、ピストンストローク、熱交換器の形状に関しては、これまでに開発してきたスターリングエンジンの設計手法⁽⁶⁾に基づいて設計した。

図3に原型機の構造を示す。原型機は、再生器を内蔵したディスプレーサとパワーピストンを1つのシリンダ内に直列に配置した β 型である。スターリングサイクル機関は構成要素の配置や機構の形状からいくつかに分類され、その代表的なものが図4に示すような α 型、 β 型、 γ 型である。 β 型は α 型や γ 型に比べて作動空間（圧縮室、膨張室）以外の空間、いわゆる死容積を極力小さくすることが可能である。したがって、死容積による圧縮比の低下は α 型や γ 型よりも小さくなり、性能へ与える影響を低くすることが可能である。再生器のマトリックス（蓄冷材）は直径 $\phi 50$ 、#100銅材の金網を用いている。また、ディスプレーサの上端とシリンダ内部は膨張ガスと低温端となる冷却ヘッドとの熱伝達促進のため互いにかみ合うよう同軸状にフィンを設けている。ディスプレーサはその両端の熱リークを押さえることと、軽量化をねらい、ガラス繊維強化フェノール系樹脂材を用いた。

シリンダヘッドには電気ヒータが貼り付けられており、冷凍能力はこの電気ヒータの電力とした。またシリンダは真空断熱容器と輻射シールドによって外気と熱遮断している。放熱器は、実験の便宜上から水冷式放熱器を採用した。モータは動作特性の評価を行う上で十分に余裕のある出力を得られるようにDC 200 Wサーボモータを搭載し、スコッチヨーク機構によってピストンに動力を伝達するように設計した。

3.2 基本動作特性

(1) 冷却ヘッド温度と冷凍能力との関係

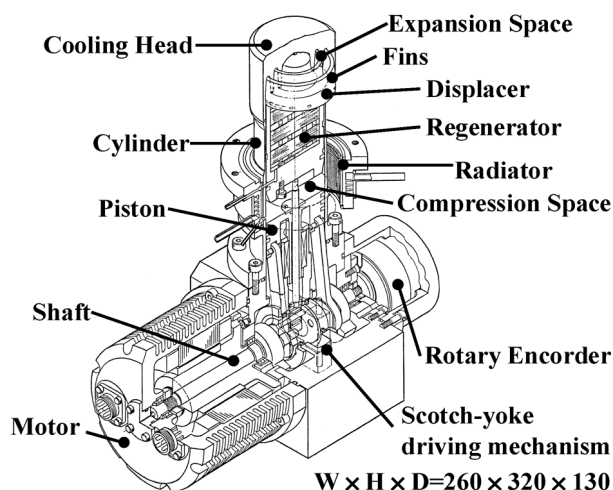


Fig. 3 Schematic view of prototype machine

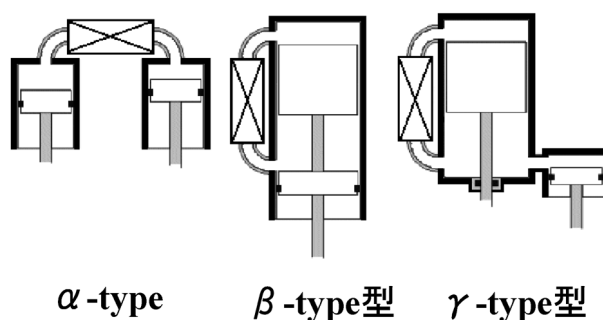


Fig. 4 Typical figuration of Stirling machine

図5に実験により得られた冷却ヘッド温度とその時の冷凍能力の関係を示す。冷凍能力は冷却ヘッド温度に対して線形的に増加しており、その割合は運転周波数によらずほぼ同等の傾きとなっている。このように熱負荷によって冷却ヘッド温度が単純に決定されるので、冷凍能力の制御は蒸気圧縮式に比べて簡便化される可能性がある。また、運転周波数が16.7 Hzにおいて冷凍能力100 Wを得たときの冷却ヘッド温度は252.3 Kであり、また、冷却ヘッド温度が233 Kのときの冷凍能力は82 Wであった。この値は設計値に若干未達であるが、原型機としては十分な性能を有している。

(2) 封入圧力と冷却ヘッド温度との関係

冷却ヘッド温度または冷凍能力のコントロールは運転周波数の他に作動ガスの封入圧力によっても可能である。封入圧力による冷凍機性能を検討した結果を図6に示す。図より圧力が上昇すると冷却ヘッド温度は単純低下することが明らかである。これは、例えば同仕様の冷凍機で封入圧力のみを変えれば能力ランクの違う冷凍機を提供できることになり、蒸気圧縮式冷凍機には無い大きな特長である。

(3) COPによる性能評価

冷凍機の性能を評価する場合、システムに投入される

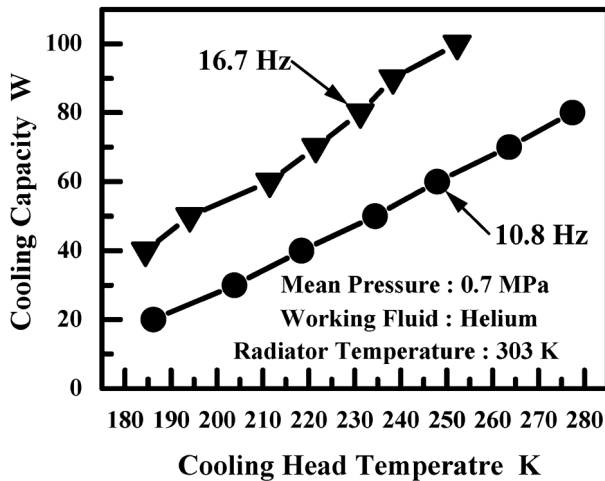


Fig. 5 Cooling capacity as function of cold head temperature

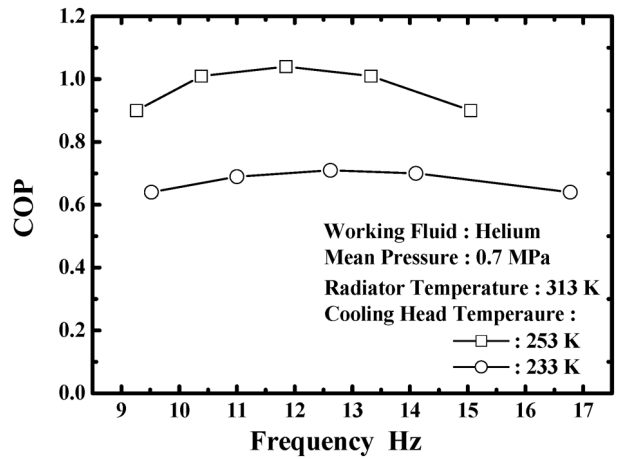


Fig. 7 COP Curves

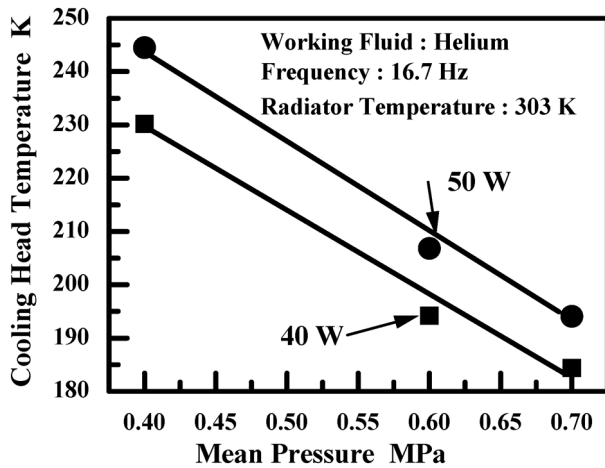


Fig. 6 Effects of mean pressure on cooling head temperature

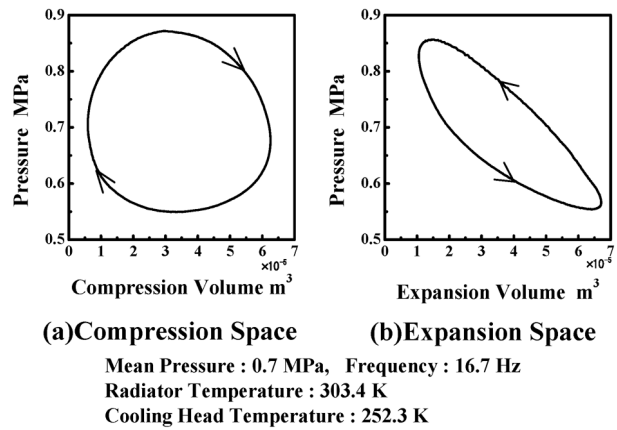
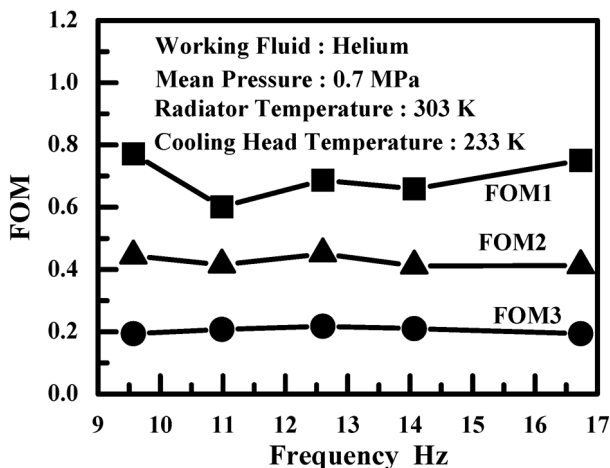


Fig. 8 PV Diagrams

電気入力と冷凍能力の比、すなわち COP (Coefficient of performance) が一つの重要なファクタになる。スターリング冷凍機も同様にモータ入力と冷凍能力から求まる COP によって最終的な性能評価が行われる。このような COP による評価は、一般的に家庭用冷凍機分野では最も重要視されるため、機構部やモータが最適化されていない段階の原型機においても、同分野への応用の可能性評価には欠かせない。運転周波数に対する COP を冷却ヘッド温度一定の条件で整理した結果を図 7 に示す。圧縮室と膨張室の温度差が小さい 253 K のほうが 233 K よりも高くなっている。目標である 233 K では COP は 0.7 以上、253 K では 1.0 以上を示しており、最高で 1.05 であった。また、13 Hz 近傍にピークを持った上に凸の特性を有していることがわかる。運転周波数が低い領域で COP が低いのは、この領域でモータ効率が低いためである。また、運転周波数が高い領域では、機械損失が増大するために COP は低くなっている。

(4) 図示効率による性能評価

原型機は、実験の便宜上によりモータや機構部の仕様を決めているので、最適な駆動形態となっていない。したがって、COP 評価の他にも機械損失やモータ損失を含まない熱力学的な評価が必要である。そこで、図示効率の評価を行った。図示効率は 1 サイクルについて、圧縮室、膨張室内の圧力変動と体積変化から図示仕事を算出して効率評価を行うものである。圧縮室と膨張室における体積変化と圧力変動の関係の代表例を図 8 に示す。それぞれ 1 サイクルについて積分した値が図示圧縮仕事、図示膨張仕事 (冷却量) であり、これらの和が熱力学的な入力値の図示仕事量である。したがって、図示仕事量をモータの電気入力の代わりに用いて効率評価をすれば、機械損失やモータ損失を含まない評価が可能である。また、冷凍能力の代わりに図示冷却量を用いれば、再生器損失や熱伝導損失などの冷却部における損失を取り除いた評価が可能となる。さらに、これらの効率評価において、温度の影響を取り除くためにカルノー効率との比で示した FOM (Figure of Merit: 以後、FOM と呼ぶ) を導入する。COP_j (j=1, 2, 3) とカルノー効率の比である FOM_j (j=1, 2, 3) を図 9 に示す。



$$FOM_j (j=1,2,3) = COP_j (j=1,2,3) / \eta$$

$$\eta : \text{Carnot Efficiency}$$

Fig. 9 FOM Curves

COP_j ($j=1, 2, 3$) は式(1), (2), (3)によって与えられる。

$$COP1 = W_{ie} / W_i \quad (1)$$

$$COP2 = Q_e / W_i \quad (2)$$

$$COP3 = Q_e / W_m \quad (3)$$

W_{ie} : 図示冷却量 (図示膨張仕事), W_i : 図示仕事
 W_m : モータ電気入力, Q_e : 冷凍能力

図より, 運転周波数9.8 HzにおいてFOM3は0.24得られていることがわかる。FOM3はFOM1の約30%である。また, 図示仕事とモータ電気入力との比は0.4~0.5程度, 冷凍能力と図示冷却量との比は最大で約0.7である。よってモータあるいはモータからピストンへの動力伝達における機械損失が大きいことが明らかになった。

(5) 熱収支

図10に大まかな熱収支を一例として示す。モータの電気入力から実際に熱力学的な仕事に変換される際の損失量が多いことが示されている。また, 得られる冷却熱量のうち熱損失により失われる量が多いことも示されている。これらの損失量の低減を今後進めていく必要がある。

(6) プルダウン試験

原型機を実際に冷蔵庫に搭載して庫内の冷却実験を行った。庫内の冷却を行うための伝熱面積を確保するために, 二次冷媒としてブライン (エチレングリコール水溶液, 以後ブラインという) を用い, 冷却ヘッドの冷熱を庫内に搬送する二次冷媒直冷式熱搬送システムを構成した。図11に熱搬送システムの構成を示す。冷却ヘッド部にはブラインの液溜容器を設置し, 冷却ヘッドには伝熱フィンを構成している。原型機の放熱器には恒温循環機を用いて315 Kの一定温度, 一定流量にして連続通水した。実験は, 大気開放状態から冷凍庫の冷却を行いその経時変化を調査した。図12にその結果を示す。図は

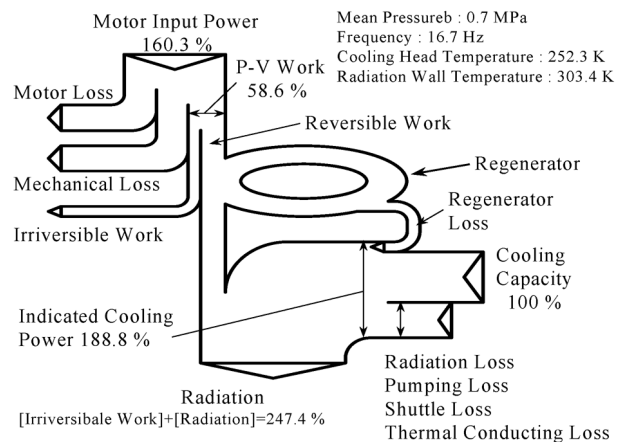


Fig. 10 Heat Balance

冷却ヘッド壁温, 庫内温度, 冷蔵庫入口冷媒温度の変化を示している。冷却ヘッド壁温は, 運転開始後50 min後に約263 Kに達している。また約258 Kで準定常となっている。冷却ヘッド壁温と熱交換機入口の温度差が約10 Kあるが, これは熱交換器ケースからの放熱による損失が大きいためである。今後断熱性能を向上させていく必要がある。庫内の温度は約270 Kが得られている。これは, 配管経路からの熱損失が大きいためであるが, 今後熱搬送システムの最適化を図ることにより改善可能である。

4. ハイブリッド再生器

スターリング冷凍機は, 家庭用冷凍機として実用化を図るために, 高い効率が求められる。原型機により得られた基本動作特性から, 機械損失の低減が必要であることが明らかになっている。そこで, 往復動作するディスプレイサの軽量化を図り機械損失の低減を図った。ディスプレイサの中には死容積を低減させるために再生器を内蔵しており, 再生器の蓄熱材に銅材のメッシュを用いているためにディスプレイサの重量が大きくなっている。そこで, より軽量のナイロンメッシュを蓄熱材として用い, これに剛性を補うために銅材のメッシュを混合して用いるハイブリッド再生器を考案し冷凍機に搭載した。ここでは, ハイブリッド再生器の概要とその動作特性について述べる。

4.1 ハイブリッド再生器の概要

ナイロンメッシュと銅メッシュを混合して用いる再生器をハイブリッド再生器と定義し, 混合メッシュをハイブリッドマトリクスという。マトリクスは図13に示すように, 銅およびナイロン繊維を直径50 mmの円形に切断し使用した。ハイブリッドマトリクスの混合率 (以下混合率という) ϵ [%] は, マトリクスを積層したときに占める体積の比 ($[銅]/[銅+ナイロン]$) として定義する。また, 図14に示すようにマトリクスは銅とナイ

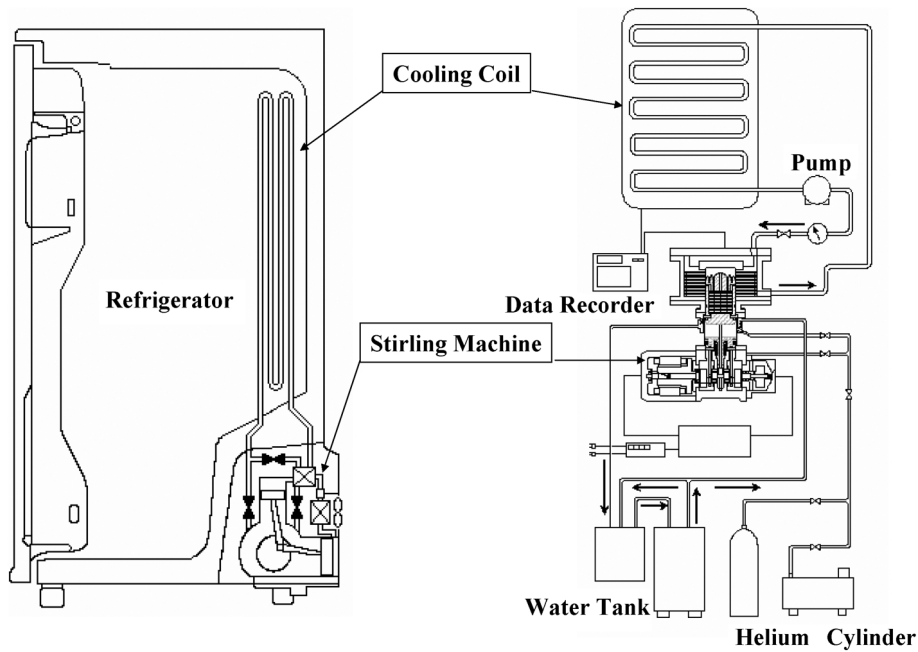


Fig. 11 Heat Transfer System

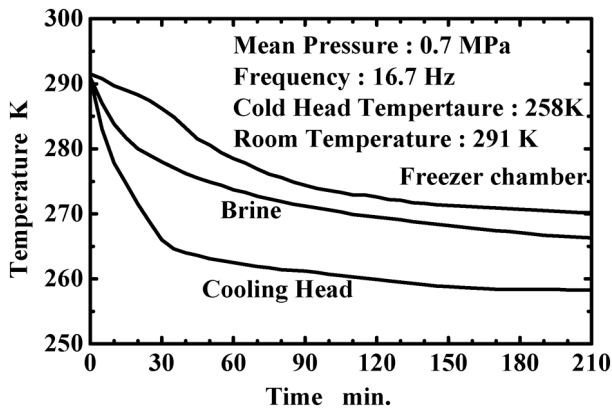


Fig. 12 Pull-down Test Results

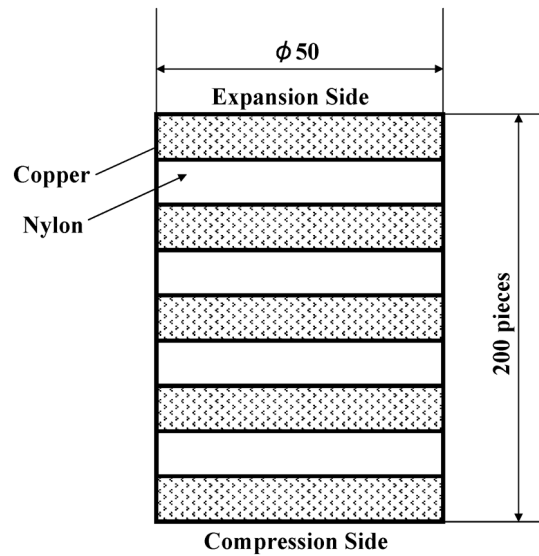


Fig. 14 Hybrid-regenerator

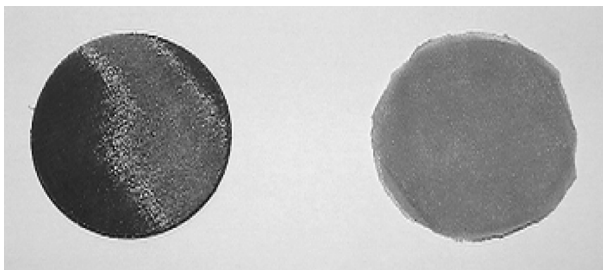


Fig. 13 Matrix

ロンを互いに所定の量を交互に積層している。これは、ナイロンマトリクスだけでは剛性が低いため圧力変動による目潰れを引き起こし圧力損失が増大することを防ぐためである。交互に銅マトリクスを混入させると剛性が

向上し圧力損失を低減することが可能だからである。表3に、ナイロンの性状を示す。ナイロンは銅に比べて熱伝導率が小さく熱容量が大きいので、再生器のように短い長さで高温側と低温側の温度差が比較的大きいスターリング冷凍機に用いる蓄熱材として優れている。また、死容積を低減させるために再生器をディスプレイサに内蔵させて連絡配管の容積を低く抑える必要があるが、銅マトリクスは重いため往復動作するディスプレイサへの内蔵に適さないが、銅よりも軽いナイロンを用いることにより、機械損失を低く抑制することが可能である。

実験により、ハイブリッドマトリクスの圧力損失を調

査した結果を図15に示す。冷凍機の回転速度が速いと速度にはほぼ比例して圧力損失が増加している。また混合率が小さいとき、すなわちナイロンマトリクスの割合が大きいときは、回転速度が速いほど圧力損失が大きくなっている。これは、ナイロンマトリクスの剛性が低いため、目潰れを起こして流動抵抗が増大しているためである。しかし、回転速度が低くなると、この傾向は緩やかになっている。混合率60%では、銅マトリクスのみの場合と圧力損失に大きな差は見られなくなった。したがって、低速度運転領域では、圧力損失の観点ではハイブリッド再生器は良好な特性であることが明らかになった。

Table 3 Properties of Cooper and Nylon

Properties	Copper	Nylon
Thermal conductivity W/(m·K)	400.0	0.882
Density kg/m ³	8800.0	1130.0
Specific heat J/(kg·K)	400.0	1930.0
Open area ratio	0.363	0.473

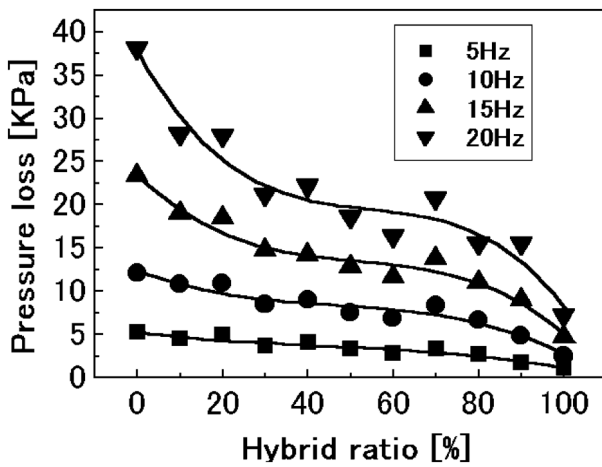
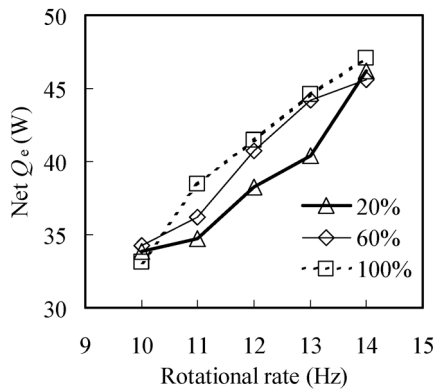


Fig. 15 Pressure Loss of Hybrid Matrix



4.2 2号原型機を用いたハイブリッド再生機の性能

ハイブリッド再生器を搭載することを目的として設計・試作した2号原型機を用いて、ハイブリッド再生器の性能評価を行った。2号原型機は、機構部の耐久性と信頼性を確保する試みとしてオイル潤滑式円筒カム機構を採用している。機構部以外の部品の仕様は原型機と同じである。図16に円筒カム式冷凍機の構成を示す。ピストン、円筒カム、モータを一直線上に配置しており、機構部への給油が容易な構成となっている。

図17に2号原型機を用いた評価結果として冷凍能力と図示冷凍能力を示した。銅マトリクスのみ再生器を用いた場合、図示冷凍能力はハイブリッド再生器よりも高くなっている。しかし、低速運転時にはハイブリッド再生器の方が高い冷凍能力が得られている。これは、再生器効率が向上していることと、熱伝導損失が低くなったためである。また、図18にCOPと図示COPを示

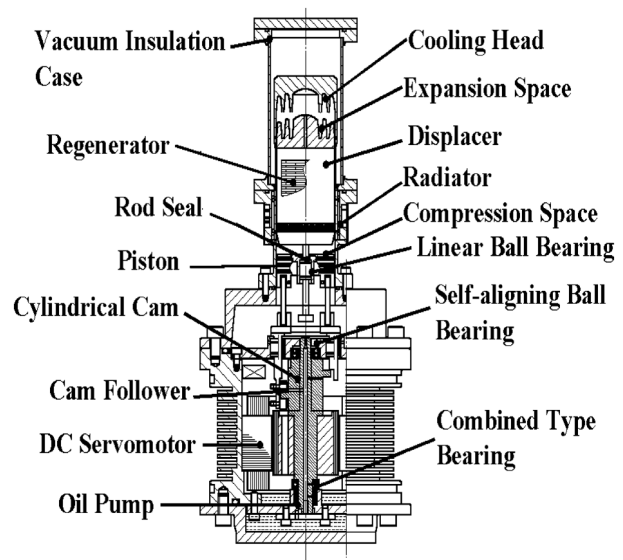


Fig. 16 Schematic View of The Cylindrical Cam Type Stirling refrigerator

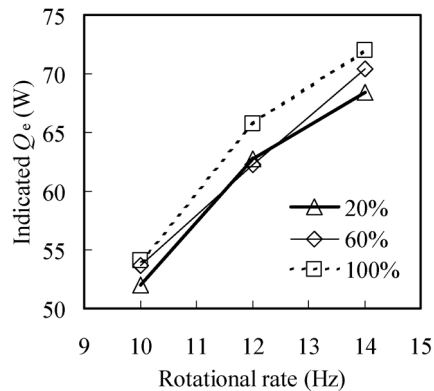


Fig. 17 Effects of hybrid ratio on cooling capacity

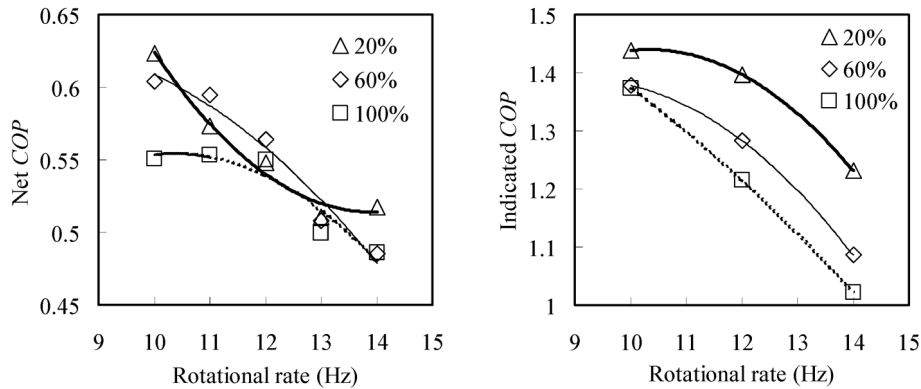


Fig. 18 Effects of hybrid ratio on COP

す。図示 COP はハイブリッド再生器の方が高い値が得られており、混合率20%のときには約20%向上している。しかし、COP で評価すると、混合率20%のときは下に凸の曲線になっており、低速域と高速域では他よりも高い COP が得られた。低速域で混合率が低いハイブリッド再生器の COP が高いのは、ナイロンマトリクスが目潰れによる圧力損失がそれほど大きくないためである。高速域で同様に COP が高いのは、ナイロンが多いため往復動で動くディスプレイサの重量が軽くなり、機械損失が減少するためである。これらの結果から、運転速度と混合率の最適化が必要であるものの、ハイブリッド再生器はスターリング冷凍機の効率向上に有効な再生器を実現できることが明らかになった。

5. 能動型再生器

ハイブリッドマトリクスのように、高効率化のために軽量で柔軟性のあるマトリクスを再生器に使用すると、マトリクスが再生器ハウジング内部で往復運動し、動作条件により、再生器内部の残留ガスの増減や流動損失が変化して冷凍能力に影響を及ぼす問題がある。しかし、マトリクスの伸縮を利用すれば冷凍機の性能が向上する。ここでは、マトリクスの伸縮を利用した能動型再生器の動作特性について述べる。

5.1 3号原型機の概要

能動型再生器の動作特性を評価するために、ピストンとディスプレイサの他にディスプレイサの中に内蔵する伸縮可能な蓄熱材の粗密を制御するピストン（以後、マトリクスピストンという）が必要である。そのために2号原型機を改造した構造の3号原型機を設計・試作した。図19に3号原型機の概略断面図を示す。3号原型機は、円筒カムを2つ使用しており、パワーピストンとディスプレイサピストン、マトリクスピストンで円筒カムを別々に使い分けることができる構造となっている。次に駆動機構詳細図を図20に示す。マトリクスピストンは内側の外歯円筒カムにて駆動している。対して外側の円筒カムは内溝カムとなっている。この外側内溝カム

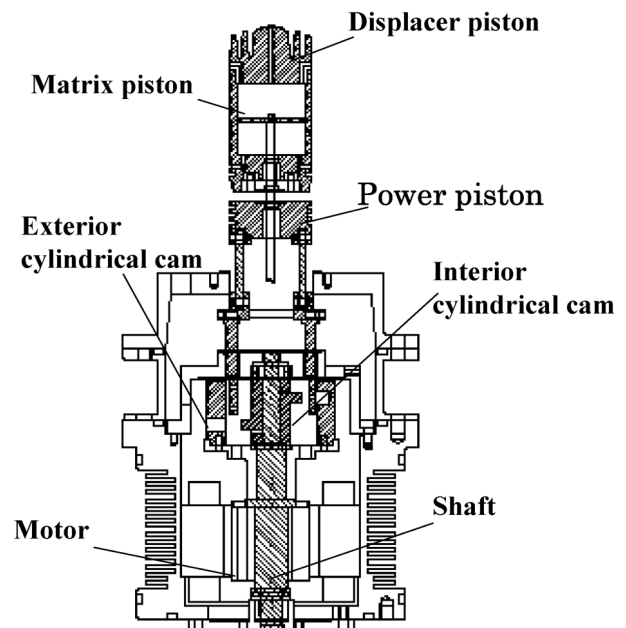


Fig. 19 Schematic Drawing of Stirling Refrigerator with Active Type Regenerator

にてパワーピストンおよびディスプレイサピストンを駆動する。ディスプレイサピストンに対するマトリクスピストンの位相差は15°ごとに変更可能である。

5.2 能動型再生器

3号原型機において、作動ガスの圧縮・膨張を行うパワーピストンの行程容積から算出される作動ガス（ヘリウム）の量は56.5 ccである。対して、死容積部は全体で約98.0 ccであり、そのうちマトリクス空隙部分にある残留ガスは71.4 ccである。この死容積の大部分を占める空隙部残留ガスを、スターリングサイクルの等温膨張・等温圧縮における影響を減少させることで、圧縮・膨張の効率は上昇する。これを効率よく行うのが能動型再生器の目的である。能動型再生器は、マトリクス空隙部分にある残留ガスを、スターリングサイクルの等温圧縮過程、等温膨張過程にも積極的に使用する。

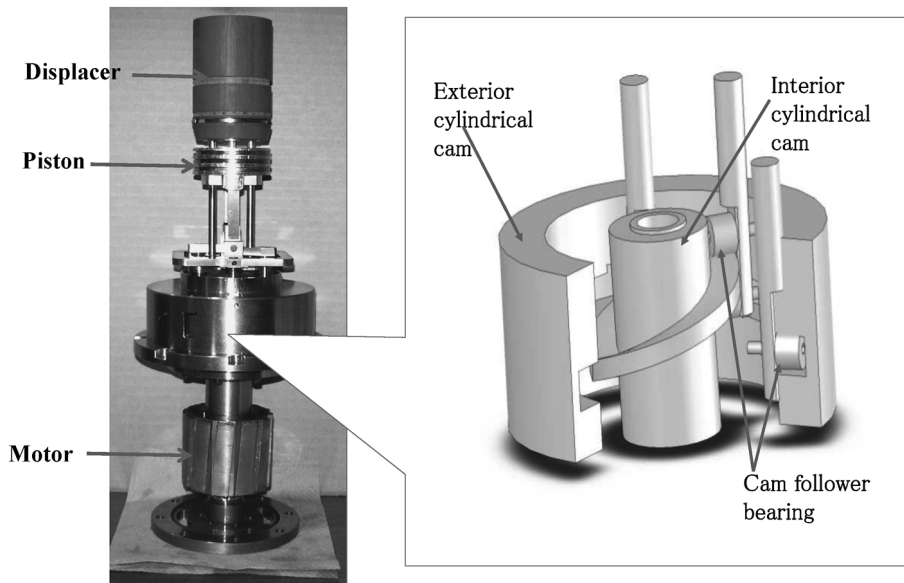


Fig. 20 Schematic View of The Driving Mechanism

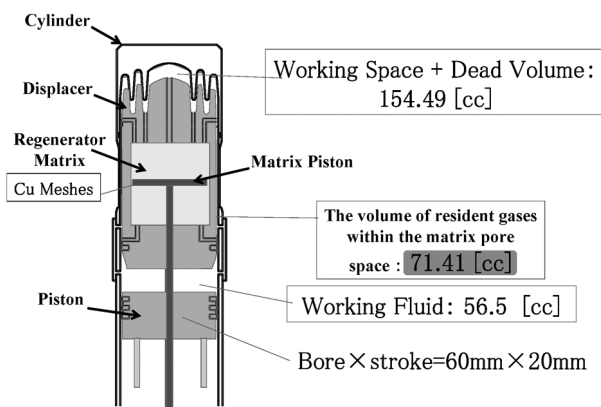


Fig. 21 Active type regenerator

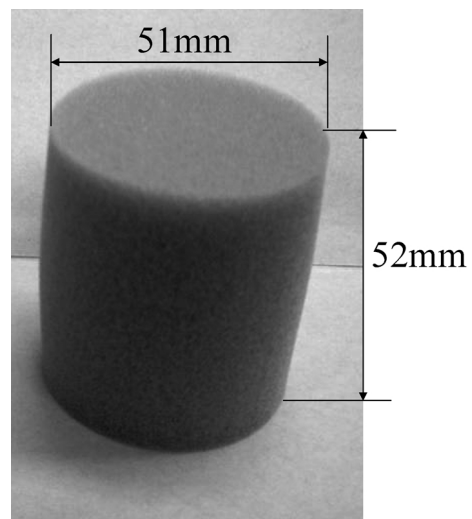


Fig. 22 Urethane Matrix

能動型再生器のワーピストンから上側部分の概略断面図を図21に示す。ディスプレイサピストン内部に構築されたマトリクスピストンの上下にウレタンマトリクスを1個ずつ圧縮充填する。これをディスプレイサピストンの動きにあわせて異なる位相差で動作するマトリクスピストンにて圧縮・膨張を行う。

5.3 ウレタンマトリクス

能動型再生器の蓄熱材として使用したウレタンマトリクスを図22に示し、ウレタンマトリクスの幾何学形状値を表4に示す。材料には安価で手に入りやすい、エーテル系ウレタンフォーム一般汎用材を使用する。ウレタンの加工は打抜き型によるプレス抜き加工にて行った。ウレタンマトリクスの詳細な熱物性値は、今後明らかにしていく必要があるが、参考に一般的なウレタンフォームの物性値、および比較のために一般的に再生器マトリクスとして使用される銅メッシュを200枚積層した場合の物性値を表5に示す。ウレタンマトリクスは熱

Table 4 Values of geometrical various Urethane matrix

Diameter	51 (mm)
Height	52 (mm)
Density	20±2 (kg/m ³)
Number of cell	60 (number/25 mm)
Weight	2.12 (g)

伝導率が低く、また高い空隙率から圧力損失の低下も期待できる。マトリクス蓄熱容量に関しては密度の低さから銅と比較して低くなる傾向にあるが、ウレタンマトリクスを圧縮充填することで補うことが出来る。また、柔軟で変形しても復元力があることから、マトリクスピス

Table 5 Properties of Copper and Urethane form

	Copper	Urethane form
Thermal conductivity (W/mK)	400	0.018~0.042
Density (Kg/m ³)	8800	12~100
Specific heat (J/Kg·K)	385	1800~2800
Volume opening ratio	0.728	0.90~0.98
Weight of matrix (g)	244.3	1.23~10.21
Thermal capacity of matrix (J/K)	97.61	2.21~28.59

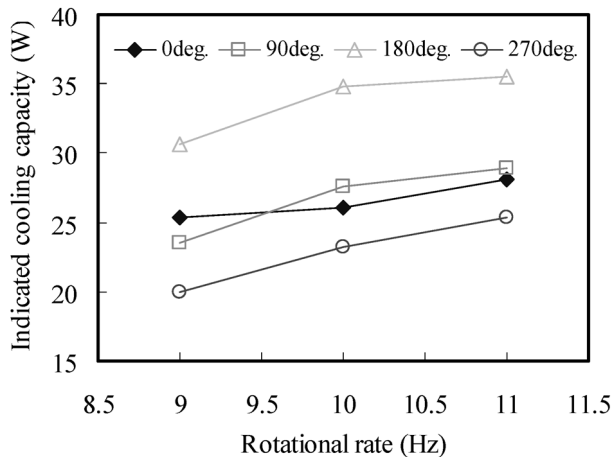


Fig. 23 Indicated Cooling Capacity

トンにて圧縮・膨張を行う能動型再生器材料に適している。

5.4 能動型再生器の動作特性

3号原型機を用いて能動型再生器を搭載したスターリング冷凍機の動作特性を評価した。図示冷凍能力に及ぼす位相差の影響を図23に、図示 COP に及ぼす位相差の影響を図24に示す。また、運転周波数10 Hz のときの膨張空間 P-V 線図を図25に、圧縮空間 P-V 線図を図26に示す。

図23および図24から位相差180°のものが最も高い性能を示しており、その値は位相差0°のものと比較して図示冷凍能力で最大約1.3倍、図示 COP で最大約1.5倍となっている。そして図25および図26より位相差180°のリサージュ図形の上半分が位相差0°のものと重なり、リサージュ図形の下半分が位相差90°のものと重なって、最も大きな面積を占めている。これらの理由は、位相差180°のマトリクスピストンが等温圧縮過程（ディスプレイサピストン位置0°~90°）において、ウレタンマトリクスを圧縮空間側に圧縮させており、その変形量が大きいためウレタンマトリクス内部を目潰れによりガスが通過できなくなり、膨張側ウレタンマトリクスの空隙部残留ガスと圧縮空間を一時的に隔離する弁のような働きをしたため、効率よい圧縮行程が実現されたと考え

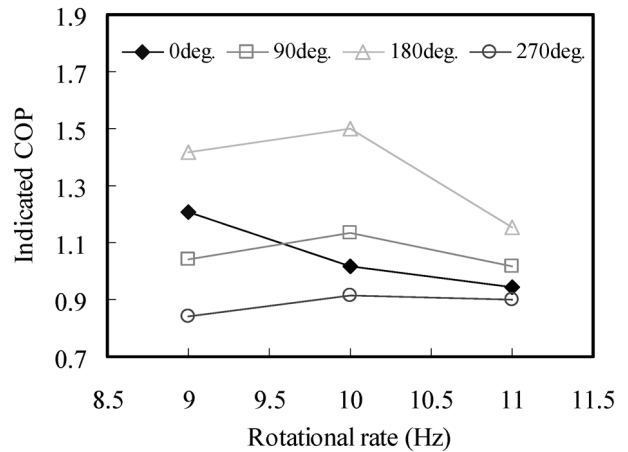


Fig. 24 Indicated COP

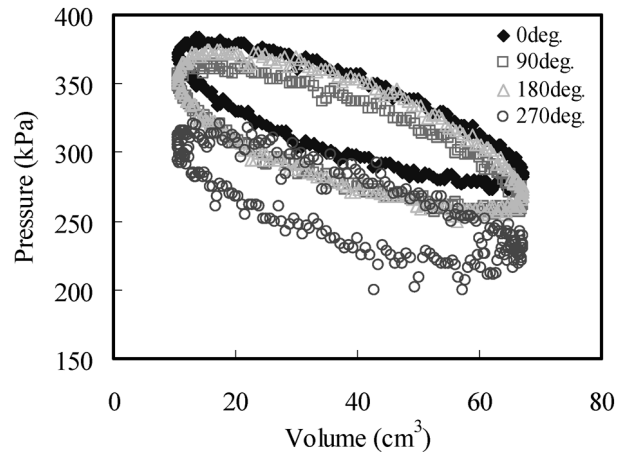


Fig. 25 PV Diagrams of Expansion Space

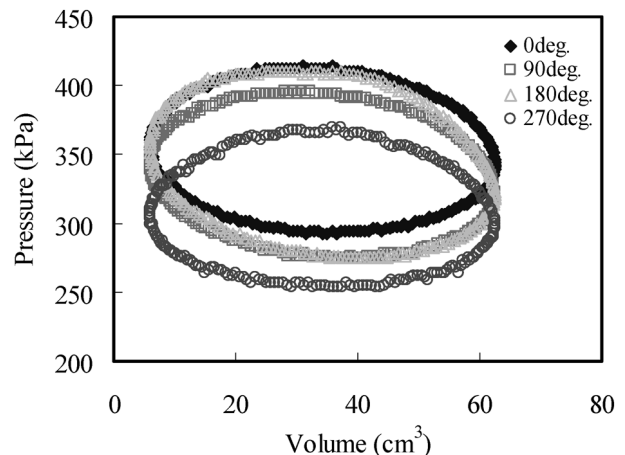


Fig. 26 PV Diagrams of Compression Space

られる。同様に等温膨張過程（ディスプレイサピストン位置180°~270°）においても効率よい膨張行程が実現され、性能が向上したと考えられる。

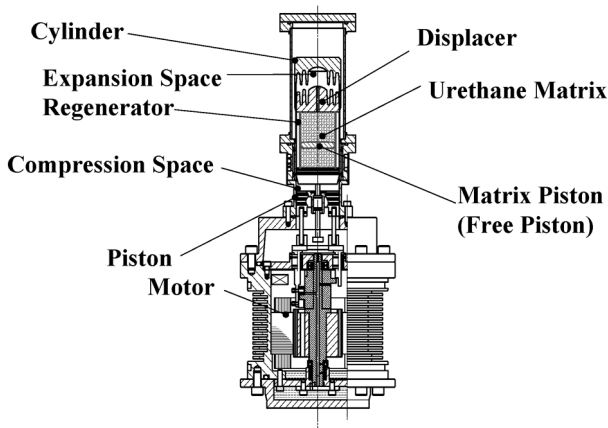


Fig. 27 Active Type Regenerator used Free Piston as a Matrix Piston

5.5 能動型再生器の課題

能動型再生器は、冷凍機の性能に良好な性能を与えるが、マトリクスピストンをしかるべき位相差で駆動することは、機構部が複雑化する上に、冷凍機の生産性の観点からも実現が難しい。しかし、図27に示すように、マトリクスピストンをフリーピストンとして、ディスプレイサの往復動作に連動して所定の位相差で運動するように構成すれば、前述の問題は解決することが可能である。

6. まとめ

6.1 家庭用スターリング冷凍機の基本動作特性

スターリング冷凍機の家用品用冷凍機への応用のため、基本的な性能評価を100 W 級原型機を用いて行った。その結果、良好な結果が得られ、ノンフロン冷凍機として有力な候補になり得ることが明らかになった。また、効率向上の施策として、ハイブリッド再生器を提案し、その流動特性と動作特性を実験により明らかにした。冷凍機の低速度運転領域で良好な性能を示している。さらに、ディスプレイサの往復運動に合わせてマトリクスを変形させるマトリクスピストンを備えた能動型再生器を考案し、これにウレタンマトリクスを搭載して実験を行った結果、スターリング冷凍機用再生器の新しいシステムとしての有効性を確認した。

6.2 家庭用スターリング冷凍機の展望

スターリング冷凍機は、開発の歴史が長く、極低温用冷凍機やクーラボックス用冷凍機では一部に実用化例があり、分野や用途によっては実用化が進められている。しかし、家庭用冷凍機に関しては、高効率、耐久性、低コストが強く求められるため、実用化にはさらなる研究が必要であろう。しかし、再生器の効率向上は冷凍機全体の効率の向上に大きな影響を与えるので、ハイブリッド再生器や能動型再生器といった新型再生器が実用化に向けた課題の有効な解決策のひとつとなる。また、家庭温度領域を $-40\sim 40^{\circ}\text{C}$ 近辺と定義すると、現在 -40°C 程度の中低温領域を得意とする冷凍システムは多くない。したがって、この温度領域でも問題なく良好に作動するスターリング冷凍機に対する期待は大きい。今後、高効率、耐久性確保、低コスト化がさらに進められれば、家庭用冷凍機や中低温領域で作動する家庭用冷凍庫などへの応用展開に大きな期待がかかる。

参考文献

- (1) 家庭用スターリング冷凍機の動作特性に関する研究, 大高敏男, 他 3 名, 日本冷凍空調学会論文集 Vol. 17, No. 3 pp. 391-400, (2000)
- (2) 低温度差小型スターリング冷凍機の性能特性に関する研究, 大高敏男, 他 3 名, 日本機械学会論文集 B67巻656号 pp. 1049-1057, (2001)
- (3) Study of Mechanical Loss on a Cylinder Cam Type Stirling Cycle Refrigerator, T. Otaka, et. al., Proc. 10th International Stirling Engine Conference pp. 494-498, (2001)
- (4) Fundamental Study of small-Size Stirling Refrigerator with Active-Type Regenerator, T. Otaka, et. al., Proc. The 13th International Stirling Engine Conference, pp. 139-142, (2007)
- (5) Thermodynamics Characteristics of Hybrid Regenerator for Stirling Refrigerator, T. Otaka, et. al., Proc. The 3rd Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, pp. 753-756, (2006)
- (6) Design and Development of a Miniature Stirling Machine, T. Otaka, et. al., Proc. 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference vol. 5, pp. 192-197, (1993)
- (7) スターリングサイクル機関, 特願 2006-046153, (2006)
- (8) オイル潤滑式スターリング冷凍機の動作特性, 大高敏男, 他 3 名, 日本機械学会 第9回スターリングサイクルシンポジウムを講演論文集, pp. 53-54, (2005)