D02 ハイブリッド再生器を搭載したスターリング冷凍機の動作特性に関する研究

Study of Performance Characteristics on a Stirling Refrigerator with the Hybrid - Regenerator

○学 前田 匡雅（都立大） 学 夏井 博行（都立大）
正 太田 正廣（都立大） 正 大高 敏男（都立高専）

Tadamasa Maeda, Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami-osawa, Hachioji-shi, Tokyo
Hiroyuki Natsui, Tokyo Metropolitan University
Masahiro Ota, Tokyo Metropolitan University
Toshio Otaka, Tokyo Metropolitan College of Technology

This paper describes some performance characteristics shown by the P-V analysis on a stirling refrigerator with a hybrid regenerator made of copper matrixes and nylon ones for the less flow loss by changing the way to mix on hybrid matrixes.

In order to perform the efficiency of compact stirling refrigerators with a regenerator in the displacer well, it is effective to lighten the weight of regenerators and reduce motor input. For this reasons, we proposed using the hybrid regenerator. However, the nylon matrixes have larger flow loss than that of copper matrixes. Therefore the ratio of copper matrixes and nylon ones and the way to mix are important to improve the COP.

Key Words : Stirling refrigerator, Regenerator, Matrix, Nylon, Hybrid matrix, COP

1. 結論

スターリング冷凍機はフロン系冷媒を必要としないので自然環境に与える負荷が軽く、理論効率がカルノー効率と等しいため、地球に優しい冷凍システムといえることができる。しかし現状では家庭用冷凍機など常温レベルの分野に応用されておらず、家庭用として実用化するためには効率を上げることが必須課題である。また再生器はスターリングサイクル機器において効率を高める重要な要素であり、この再生器の性能の良否によってスターリング冷凍機の効率は大きく左右される。このため本研究室では再生器に関して研究を重ねてきた。すなわち、再生器マトリクスにナイロンマトリクスと銅マトリクスを混合したハイブリッドマトリクス（以下ハイブリッドマトリクスと呼ぶ）を用いることを提案してきた⁽¹⁾。再生器マトリクスには金属マトリクスが多く用いられてきたが、コンパクト化のため往復運動部分に再生器を構築したディスプレイサ型スターリング冷凍機において、銅より軽いナイロンを混合しハイブリッド化することで機械損失の低減を実現し、冷凍機の消費電力を最大 25%低減できることが明らかになった⁽¹⁾。またナイロンマトリクスを再生器マトリクスとした場合、同一機で銅マトリクスを使用した場合の 80%程度の冷凍能力を持つことが明らかになった⁽¹⁾。しかしナイロンマトリクスを用いることで作動流体が再生器内を通過する際に発生する流動損失が大きくなり、効率が低下する問題がある⁽²⁾。以上のことから、ハイブリッドマトリクスの混合率と混合方法が効率を大きく左右することがわかっている。

本紙では、ハイブリッドマトリクスの混合方法を変えることによる図示能力の違いを検討することを目的に、ハイブリッド再生器を搭載した円筒カム型スターリング冷凍機（以下 2 号原型機と呼ぶ）における P-V 解析を行い、各混合方法におけるハイブリッド再生器を搭載したスターリング冷凍機の動作特性を把握したので報告する。

2. ハイブリッドマトリクス

2-1. マトリクス

マトリクスは Fig.1 に示すように、銅およびナイロン繊維を直径 50mm の円形に切断し使用した。また参考として Table.1 にナイロンと銅の物性値を示す。これよりナイロンマトリクスは銅マトリクスと比較して比重は約 1/8、比熱は約 5 倍、開口比は約 1.3 倍となっている。

Fig.1 Matrix

Table.1 Properties of Copper and Nylon

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

2-2. ハイブリッド混合率

ハイブリッドマトリクスの混合率（以下混合率と呼ぶ）を ε [%] とし、式(1)のように積載枚数で定義する。ここでは全マトリクスの枚数は設計値である 200 枚を用いる。また、Table. 2 に両マトリクスが同じ圧力損失を持つときの重量とディスプレイサの重量を示す。これによりナイロンマトリクス 100%充填時のディスプレイサ重量は、銅マトリクス 100%充填時のディスプレイサ重量における 0.6 倍程度であることがわかる。なお、銅マトリクス 100%とナイロンマトリクス 100%での評価はこの値を用いている。

$$\text{混合率 } \varepsilon [\%] = \frac{\text{銅マトリクスの枚数}}{\text{全マトリクスの枚数}} \times 100 \quad (1)$$

($\varepsilon = 0\%$ のとき銅マトリクス 100% 充填)

Table.2 Matrix weights at 100% filling and displacer weights

Type	Weights [g]
Cu matrix 100%	244.3
Nylon matrix 100%	51.6
Displacer	240.3

2-3. 実験条件

本実験では混合率 30% のハイブリッドマトリクスを使用する。作動流体であるヘリウムの封入ガス圧力を 300kPa、モータの運転周波数を 8, 10, 12, 14Hz とする。また混合方法による動作特性の違いを定量的に検討するため、Fig. 2 のように分類する⁽³⁾。

- Type 1 : 銅マトリクスを再生器の圧縮側に配置
- Type 2 : 銅マトリクスを再生器の膨張側に配置
- Type 3 : 銅マトリクスを再生器の中心に配置
- Type 4 : 銅マトリクスとナイロンマトリクスを再生器全体に均一に配置

Fig.2 Types of Hybrid Matrix

3. 実験装置

2号原型機の設計仕様を Table3, 4 に、概略図を Fig. 3 に示す。また、駆動機構部に円筒カムを採用した実験機の特長を以下に記す。

1. 部品点数が少ないため構造がシンプルである。
2. ピストン、カム、モータなどを同一直線上に配置できるので小型化が図れ、潤滑経路の構成が容易である。

機械要素の潤滑、冷却ならびに圧縮部の密封作用をする流体として冷凍機油（ α オレフィン系潤滑油）を使用した。実験機底部に設けられたオイルパンに貯留された潤滑油は、モータ駆動軸に内蔵した油ポンプにより軸中心部を通り副軸受け、円筒カム、主軸受け、カムフォロワに給油する。ただし、圧縮ピストン、ディスプレーサなど動作空間には、直接的には給油を行わない。各摺動部に供給された潤滑油は、重力による自然滴下により再びオイルパンに戻る。このため、実験機の構成としては、上部から順にシリンダ部（ディスプレーサ、再生器及び圧縮ピストン）、駆動機構部、モータなどを同一軸線上に配置されている。また、モータは実験機本体内部に設置されているため、内部を循環する潤滑油によって冷却される。

Table.3 Design specifications of cylindrical cam type refrigerator

Basic form	Displacer type
Driving system	Cylindrical cam mechanism
Working fluid	Helium
Cooling capacity	100 W
Cold side temperature	233 K
Warm side temperature	313 K
Mean pressure	700 kPa
Operation speed	16.6 Hz
Expansion swept volume	56.5 cm ³
Compression swept volume	56.5 cm ³
Total dead volume	97.99cm ³

Table4. Break down in the total dead volume

Clearance in an expansion space	10.55cm ³
Path between an expansion space and a regenerator	2.16cm ³
Regenerator	71.41cm ³
Path between a regenerator and a warm side heat exchanger	3.74cm ³
Warm side heat exchanger	2.65cm ³
Filling pipe for working fluid	0.35cm ³
Path between a warm side exchanger and a compression space	1.16cm ³
Clearance in a compression space	5.97cm ³

Fig. 3 Schematic view of a cylindrical cam type Stirling refrigerator

4. P-V 解析

Fig. 2 に示した各混合方法におけるハイブリッド再生器を搭載したスターリング冷凍機の動作特性を比較、検討するため図示能力を計算する。このため 2号原型機の円筒カム上部に上死点信号用の凸部と 30 度ごとに凹部が刻まれたシグナルロータを取り付け、クランク角度を測定する。これをギャップセンサによって検出し、検出されたクランク角度での膨張空間・圧縮空間の圧力をセンサで測定し、圧力アンプに送る。このように検出されたクランク角度信号と圧力アンプの出力は共に FFT アナライザに送られ、PC 上で記録される。圧力アンプの出力から圧力への変換、クランク角度から動作空間容積への換算は PC 上で換算式を用いて行なわれる。その記録された換算データから P-V 線図を作成し、図示冷凍能力、図示圧縮仕事、図示仕事、図示 COP を計算する。

5. 解析結果

Fig. 2 に示した混合率 30% の 4 種類のハイブリッド再生器を使用した 2号原型機の P-V 線図を Fig. 4, 5, 6, 7 に示す。Fig. 4, 6 は圧縮空間、Fig. 5, 7 は膨張空間のものであり、Fig. 4, 5 は運転周波数 8Hz、Fig. 6, 7 は 14Hz のものである。いずれも縦軸である圧力は、封入圧力の比として無次元圧力として示した。

Fig.4 P-V diagram of the compression side at motor operation Speed 8Hz

Fig.5 P-V diagram of the Expansion side at motor operation speed 8Hz

Fig.6 P-V diagram of the compression side at motor operation speed 14Hz

Fig.7 P-V diagram of the Expansion side at motor operation speed 14Hz

Fig4,5 より, Type1 のハイブリッド再生器を搭載すると, 銅のみを用いた再生器を搭載した場合と比べP-V線図で囲まれる領域が若干大きくなっていることがわかる. 特に高压側で圧力損失が小さいことがわかる. 逆に Type2 では低压側で圧力損失が小さいことがわかる. また Type3 では銅のみを用いた再生器を用いた場合とほぼ変わらなかった. これは圧力波によりナイロンマトリクスが変形し圧力損失を増大させているため, 銅マトリクスを圧縮空間や膨張空間に混合することによりわずかであるが, この圧力損失の増加を低減可能であることがわかる.

また Type4 のハイブリッド再生器を搭載すると, 他の再生器を搭載するより P-V 線図で囲まれる面積が大きくなる. これは銅マトリクスによってナイロンマトリクスの変形による圧力損失が抑制され, さらに開口比が大きいナイロンマトリクスの影響を受けて圧力損失が大幅に低減されたからであると考えられる.

Fig6,7 より運転周波数が增大すると, Type4 の再生器を搭載した場合のP-V線図は銅のみの再生器を搭載した場合に近づいてくることがわかる. これは運転周波数が増大しナイロンマトリクスの変形による圧力損失が増加したため挙動が近づいたと考えられる.

次に図示仕事と運転周波数の関係を Fig.8 に示す. これは銅マトリクスのみ使用した再生器を搭載した冷凍機と比較するため, 縦軸は実験から得られたハイブリッド再生器を搭載した冷凍機の図示仕事を, 銅マトリクスのみ使用した再生器を搭載した冷凍機の図示仕事で割った値を用いている.

Fig.8 Indicated input power with Hybrid Regenerator

Fig. 8 よりどの混合方法のハイブリッドマトリクスを搭載しても、銅のみを使用した再生器を搭載した場合と比べて図示仕事量が低減されていることがわかる。Type1, Type2, Type3 は運転周波数による違いはあるが、約 1 割程度の低減となっている。しかし Type4 を用いた場合、銅のみを使用した再生器を搭載した場合と比べ、最大で図示入力を約 40% 低減できることがわかる。

次に図示冷却量と運転周波数の関係を Fig. 6 に示す。これも Fig. 8 と同様に縦軸は実験から得られたハイブリッド再生器を搭載した冷凍機の図示仕事を、銅マトリクスのみ使用した再生器を搭載した冷凍機の図示仕事で割った値を用いている。

Fig. 9 Indicated Cooling capacity with Hybrid Regenerator

Fig. 9 より図示冷却量はどの混合方法においても大きな差はみられないことがわかる。つまり銅のみを使用した再生器を搭載した冷凍機と混合率 30% のハイブリッド再生器を搭載した冷凍機の図示冷却量は、その混合方法を変えても差はほとんどないことがわかる。しかし全体的に運転周波数が増大するに伴い、図示冷却量は減少していることがわかる。これはどの混合方法においてもほぼ同じ減少量であることから、運転周波数の増大によるナイロンマトリクスの再熱損失量が、銅マトリクスの再熱損失量よりも大きいことが要因であると考えられる。

最後に図示仕事と図示冷却量から得られる図示 COP を Fig. 10 に示す。これも Fig. 8, 9 と同様に、縦軸は実験から得られたハイブリッド再生器を搭載した冷凍機の図示 COP を銅マトリクスのみ使用した再生器を搭載した冷凍機の図示 COP で割った値を用いている。

Fig. 10 Indicated COP with Hybrid Regenerator

Fig. 8, 9 より図示冷却量はどの混合方法にしても大きな差はみられなかったため、図示 COP は各混合方法における図示仕事量の減少を大きく受けた結果となっている。全体的に運転周波数が増大すると図示 COP は減少する傾向にあることがわかる。Fig. 10 よりハイブリッド再生器は運転周波数が 10 Hz 程度の低回転域では銅のみを使用した再生器よりも高性能であることがわかる。

6. 結論

ハイブリッドマトリクスの混合率 30% における銅マトリクスとナイロンマトリクスの混合方法の違いによるスターリング冷凍機の冷却特性について、P-V 解析を行なった結果、次の知見を得た。

1. ナイロンマトリクスと銅マトリクスを交互に積層させたハイブリッド再生器を搭載することにより、銅マトリクスのみを用いた再生器を搭載した場合と比較して図示仕事を最大 4 割程度減少させることが可能である。
2. 銅マトリクスのみを用いた再生器を搭載した冷凍機と、混合率 30% のハイブリッドマトリクスを搭載した冷凍機は、ほぼ同一の図示冷却量を持つ。また混合方法の違いによる図示冷却量の差はほとんどない。
3. 運転周波数が 10 Hz 程度の低回転域ではハイブリッドマトリクスを用いることにより効率を向上させることが可能である。

以上のことより、ハイブリッド再生器の有効性を示すことができた。

7. 今後の展開

本研究によりハイブリッドマトリクスを用いた再生器を搭載したスターリング冷凍機の動作特性に関するデータを得ることができた。しかし今回の解析は作動流体の封入圧力が 300 kPa の場合のみであり、他の圧力での解析は行っていない。加えて混合率が 30% の場合のみであり、更なる実験データの蓄積を必要としているのは明らかである。

8. 参考文献

- (1) 山田敏男, 坂本守義, 村上和彦, 大高敏男, 井澤弘基, 「ナイロンマトリクス再生器を用いたスターリング冷凍機に関する研究」日本機械学会 No. 97-41 第 1 回スターリングシンポジウム講演論文集 (1997) P95-97
- (2) 関谷洋, 村上和彦, 大高敏男, 太田正廣, 「ナイロン-銅混合メッシュ再生器の流動損失」日本機械学会 No. 00-15 第 4 回スターリングシンポジウム講演論文集 (2000) P169-172
- (3) 夏井博行, 太田正廣, 大高敏男, 「ハイブリッド再生器を用いたスターリング冷凍機の冷却特性に関する研究」日本機械学会 No. 03-33 第 7 回スターリングシンポジウム講演論文集 (2003) P61-64
- (4) 山下巖, 濱口和洋, 香川澄, 平田宏一, 百瀬豊「スターリングエンジンの理論と設計」, 山海堂