

再生熱交換器における蓄熱材の複合化が伝熱特性にあたる影響

日大生産工(院)○吉川 宗範

日本大学生産工 山崎 博司 日大生産工 野村 浩司 日大生産工 氏家 康成

1. 緒言

現在、エネルギー源のほとんどが化石燃料に依存している。しかしながら、化石燃料には限りがあるため、エネルギー需要の増大に伴う化石燃料枯渇問題の対策が必要となっている。環境問題としては、温室効果ガスによる地球温暖化、 NO_x による酸性雨やPMなどの大気汚染がある。これらを背景に再び注目を浴びたのがスターリングエンジンである。スターリングエンジンは、ヘリウムや水素等の圧縮性気体を作動流体とする密封式の往復動形外燃機関である。スターリングエンジンの特徴は、理論熱効率がきわめて高いこと、外燃機関であるため熱源を選ばないこと、静粛かつ低 NO_x 等の低公害であることなどが挙げられる。これらの特徴が注目され、多くの研究が行われてきたが重量増大、ガス漏れおよびコスト削減などの問題点から民間レベルでの普及には至っていない。特にスターリングエンジンの要である再生熱交換器の工作性の低さ、性能面等にまだ種々の問題点が残されている。

本研究では、再生熱交換器の改善点として熱交換量増大および流動抵抗減少を検討することを目的としている。本報では単一蓄熱材と複合蓄熱材による伝熱特性について実験的に調べた結果を報告する。

2. 再生熱交換器および実験装置

2.1 蓄熱材および積層方法

再生熱交換器には、長さ 64 mm、容積 80 cc の円形断面を用いた。加熱空間および冷却空間との接続には内径 8 mm の SUS 303 のパ

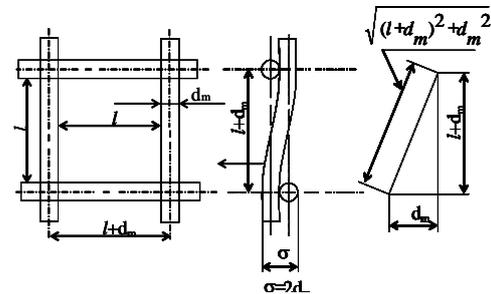
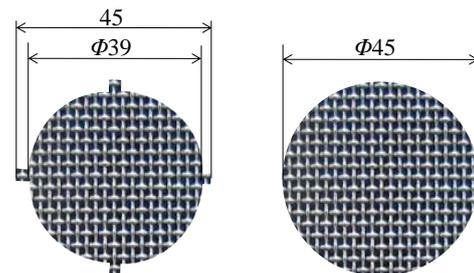


Fig.1 Schematic view of mesh

Table.1 Specification of wire mesh

Mesh No.	16	30	50	80
Wire diameter d_m (mm)	0.34	0.25	0.19	0.14
Min screen opening l (mm)	1.25	0.6	0.318	0.178
Pitch p (mm)	1.59	0.85	0.508	0.318
Opening rate ratio β	0.618	0.498	0.392	0.313
Porosity ϕ	0.828	0.759	0.686	0.622



(a) un suppressed type (b) suppressed type

Fig.2 Model of thermal storage matrix

イブを採用した。蓄熱材には平織積層金網を採用し、開口比の異なる2種類を用意した。蓄熱材の充填量は60 gとした。材質はSUS304である。蓄熱材の構造をFig.1、幾何学的形状値をTable.1に示す。蓄熱材の幾何学的形状は曲線部を近似的に直線とみなし定義する。¹⁾蓄熱材の積層方法は、作動流体の流れに垂直な積層方法を採用した。²⁾蓄熱材の積層間隔を一定とするために、シムリング(内径40 mm、外径45 mmのリング状の薄板)と蓄熱材を交互に積層し、隙間を液体ガスケッ

Effects of composite thermal storage material on heat transfer characteristics in regenerator.

Munenori YOSHIKAWA, Hiroshi YAMASAKI, Hiroshi NOMURA and Yasushige UJIIE

トで埋めた。シムリングの材質は SUS304 である。非抑止および抑止型の蓄熱材形状を Fig.2 に示す。非抑止は、蓄熱材を熱交換部直径 39 mm に成形し、シムリングで保持するために幅 4 mm の長方形保持部を四ヶ所に設けた。この場合、熱交換器内壁と蓄熱材外周部間には平均 0.5 mm の隙間があり、ここを流れる作動流体はサイドリークと呼ばれている。抑止型は、サイドリークを抑止するために蓄熱材を直径 45 mm に成形し、シムリングと交互に積層した。蓄熱材がシムリングに挟まれている部分の隙間と再生熱交換器内壁に液体ガスケットを塗りサイドリークを完全に防止している。

再生熱交換器はケースと蓄熱材ユニットが組み合わせてある。蓄熱材ユニットは蓄熱材ホルダと蓄熱材ケースに分かれており、蓄熱材ケース 5 個を 1 組みとして使用している。非抑止または抑止型それぞれの単一蓄熱材の組み合わせを Table.2 に、非抑止と抑止型の複合蓄熱材の組み合わせを Table.3 に示す。

2.2 伝熱実験装置および方法

実験装置全体の概略を Fig.3 に示す。実験装置は α 型スターリングエンジン、制御装置および計測装置から構成されている。シリンダのボアは 50 mm , ストロークは 80 mm とし、ピストンクランク機構を採用している。位相差は、圧力損失および再生熱交換作用が顕著に表れるように 180° とした。作動流体には大気圧空気を用いた。加熱側には膨張空間を設け、電気ヒータで直接、作動流体を加熱した。冷却側には膨張空間と同じ容積の圧縮空間を設け、シリンダ外壁にウォータジャケットを設けた。本実験では自立運転を行わず、可変速直流モータによって主軸を回転させた。加熱部、再生熱交換器および流路は断熱材で覆うことにより外部への熱損失を軽減した。伝熱特性の実験方法は、 α 型スターリングエンジンの回転速度を 100, 200, 300, 400

Table.2 Combination of single thermal storage medium

No	The order of regenerator elements				
	High temperature side				Low temperature side
	Suppression type				
1	80	80	50	50	30
2	50	50	30	30	16
	Un suppression type				
3	80	80	50	50	30
4	50	50	30	30	16

Table.3 Combination of composite thermal storage medium

No	The order of the heat storage material case				
	High temperature side				Low temperature side
	Suppression type		Suppression type		
5	80	80	50	50	30
6	50	50	30	30	16
	Un suppression type		Un suppression type		
7	80	80	50	50	30
8	50	50	30	30	16

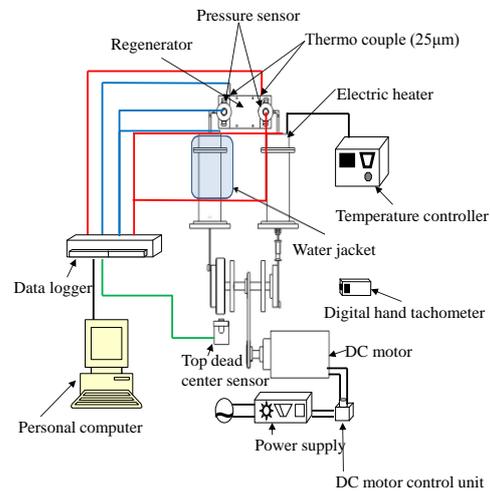


Fig.3 Experimental apparatus

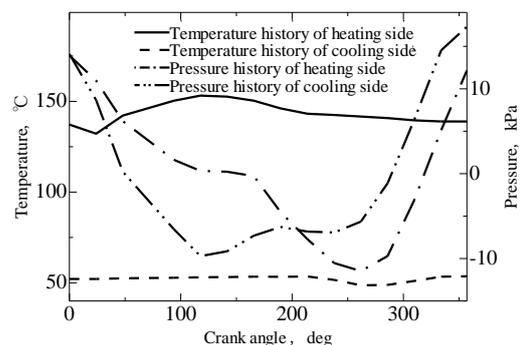


Fig.4 Temperature and pressure history in no.1

rpm と変化させた。熱交換器内条件を同一とするため、膨張空間の平均温度を 200°C, 再生器の冷却側出入口の平均温度を 50°C とした。各回転速度で、再生熱交換器内部が温度

平衡に達したところで、計測を開始した。

3. 実験結果および考察

抑止型単一蓄熱材 No.1 の温度履歴、圧力履歴を Fig.4 に、非抑止と抑止型複合蓄熱材 No.8 の温度履歴、圧力履歴を Fig.5 に示す。往復動における再生熱交換器の評価には、熱再生率 E を用いて以下のように定義する。³⁾

$$E = (\text{再生熱量}) / (\text{流入熱量})$$

$$E = \frac{\int_{180}^{360} c_p (\dot{m}_{h-out} T_{h-out} - \dot{m}_{c-in} T_{c-in}) d\theta}{\int_0^{180} c_p (\dot{m}_{h-in} T_{h-in} - \dot{m}_{c-out} T_{c-out}) d\theta}$$

ここで、 c_p は定圧比熱、 \dot{m} は質量流量、 T は温度を表している。質量流量の算出には往復運動における圧力、温度およびシリンダ容積変化を用いた。小文字の h は加熱側、 c は冷却側を表しており、 in は熱交換器への流入、 out は熱交換器からの流出を表している。例えば、 T_{h-in} は熱交換器に流入する加熱側温度を表している。その評価方法の概念図を Fig.6 に示す。この方法を用いて整理し、行った実験データをまとめた。

各単一蓄熱材における熱再生率の結果を Fig.7 に示す。熱再生率が全ての回転域において No.3 が若干高くなった。これは、サイドリークにより、蓄熱材全域を有効利用することができたため熱再生率が高くなったのではないかと考えられる。200, 300, 400rpm において、No.1 が No.2 と No.4 よりも高い熱再生率を得られた。また、従来のものと比較すると、全ての単一蓄熱材において上回っている。もしくは同等の熱再生率を得ることがわかった。このことから、エンタルピーが高い作動流体が通過する高温側に伝熱面積の大きい蓄熱材を用いて、多くの熱再生を行い、エンタルピーの小さい作動流体が通過する低温側に伝熱面積は小さいが、圧力損失の少ない低い蓄熱材を用いることが良いと考えられる。

さらなる熱再生率の向上を目指して、抑止

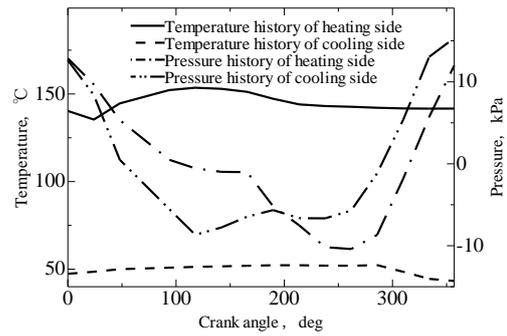


Fig.5 Temperature and pressure history in no.8

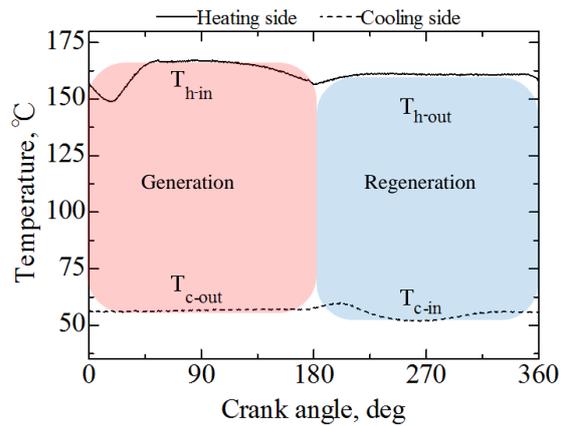


Fig.6 Evaluation method of the regenerator

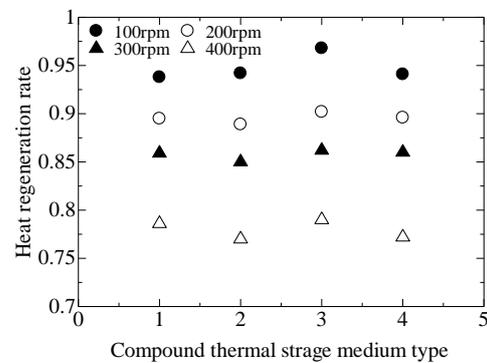


Fig.7 Heat regeneration rate and Single thermal storage medium type

型と非抑止型を複合して、実験を行った。これは、過去の研究において⁴⁾、抑止型によりサイドリークを抑止すると低速域の熱再生率が向上する。また、高速域では、非抑止型によりサイドリークを誘起することで、作動流体を再生熱交換器全域に広げることができることが分かっている。この2つは、相反するものだがそれぞれの特徴をうまく生かすこと

ができれば高い熱再生率が得られると考えられる。

各複合蓄熱材における熱再生率と回転速度の結果を Fig.8 に示す。この結果を見ると、No.5 では、低速域では比較的高い熱再生率を得ることができたが、高速域での減少率が最大となっていることがわかる。また、両端を非抑止型にした、No.7, No.8 では、低速域でも高い効率を得ることができ、高速域での減少率が低いことがわかる。その理由として、No.5 の結果になったのは、単一蓄熱材の実験結果より、高温側では伝熱性能の高い蓄熱材を使用することにより熱を回収することができる抑止型が良いとされ、さらにメッシュ数も一番細かい 80 を使用したことによりこのような結果になったと考えられる。また、No.7, No.8 の高速域での減少率が低くなった理由としては、圧力損失の少ない低いメッシュ数の蓄熱材を使用し、さらに、熱交換内壁近傍で熱交換を行う非抑止型したことにより多くの熱を回収したと考えられる。

単一蓄熱材と複合蓄熱材の熱再生率の比較を Fig.9 に示す。複合化をすることにより、すべての回転数領域で、熱再生率が向上し、その傾向は高速域になるほど顕著に表れた。このことから、複合化により非抑止型、抑止型の 2 つの特徴を生かすことができたと考えられる。また、蓄熱材の組合せは、高温側に開口率の小さい蓄熱材、低温側に開口率の大きな蓄熱材を配し、両側にはサイドリークを設けて、その中間部を抑止型とすることが良いと考えられる。

4. 結言

単一蓄熱材と複合蓄熱材による伝熱特性について実験的に調べた結果、以下の結論を得た。

1. 蓄熱材の複合化により、単一蓄熱材のときに比べ、すべての回転数領域で、熱再生率が向上し、その傾向は高速域になるほど顕著に表れた。

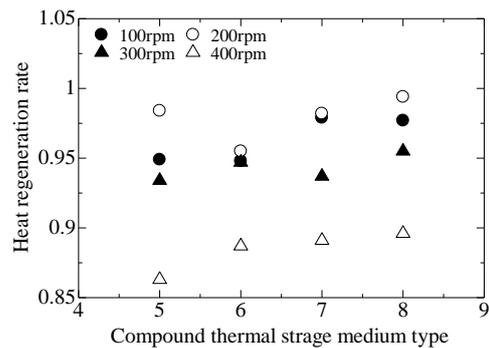


Fig.8 Heat regeneration rate and composite thermal storage medium type

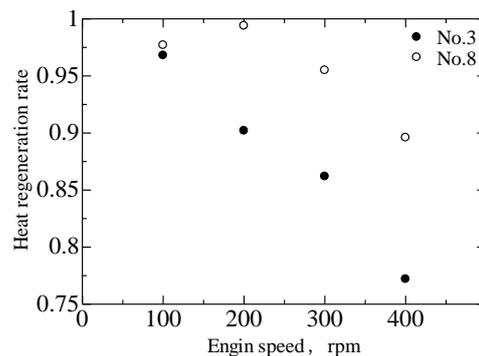


Fig.9 Heat regeneration rate and Engine speed

2. 低速域から高速域にわたって高い熱再生率が得られたのは No.8 であった。すなわち、高温側に開口率の小さい蓄熱材、低温側に開口率の大きな蓄熱材を配し、両側にサイドリークを設け、その中間部を抑止型とすることがさらなる熱再生率向上の目安と考えられる。

参考文献

- 1) 山下・濱口ほか、スターリングエンジンの理論と設計、山海堂、(1999)、pp.116-140.
- 2) 濱口・真柄ほか、金網積層体の圧力損失および伝熱特性におよぼす積層方法の影響、日本機械学会論文集(B編)、70-697 (2004)、P2425-2432
- 3) 西本・稗田、スターリング機関用蓄熱対の性能試験、日本機械学会論文集(B編)、55 -518 (1989)、pp.3255 -3265.
- 4) 葛西・氏家ほか、スターリングエンジンにおける再生熱交換器の流動特性が熱交換に及ぼす影響、日本機械学会 2010 年次大会講演論文集、pp.47-48 (2010).