ノート

低温排熱用スターリングエンジンの理論的側面からの理解と実現可能性に関する検討

須貝　裕之*

Theoretical and Feasibility Study of Stirling-engine

SUGAI Hiroyuki*

1. 緒　　言

工場などから排出される低温排熱を利用して電気エネルギーを作り出す低温排熱用スターリングエンジンは，低炭素社会の実現に貢献する技術であり，県内企業においても実用化に向けて開発が進められている。スターリングエンジンは内部の作動ガスの熱力学的変化を利用して動作する。従って出力向上には運転中の作動ガスを最も効率の良い状態に近づけることが重要となる。そこで本研究では，最初に開発中のスターリングエンジンについて熱力学や伝熱工学などの理論的側面から検討し，理想的な運転状態とそのときの理論的な出力について検討する。次に，運転中のエンジンの内部状態を実測する実験装置を作成し，理論からの乖離を調べ，装置性能向上の方向性を明らかにする。

2. スターリングエンジンについての熱力学・伝熱工学的検討

スターリングエンジンの運転状態を理論的に解析する方法の一つにシュミット理論 [1]がある。この理論により開発中の 500W 級スターリングエンジンの解析を行い，理論上の運転出力を計算する。図 1 にシュミット理論により解析するスターリングエンジンの概略構造を示す。企業にて開発中のエンジンはフリーピストン型であるが，この形式のエンジンはディスプレーサの運動抵抗が複雑になるため，ここではフリーピストンに近く，解析が容易なβ型スターリングエンジンとして解析を行った。本エンジンは開発中であるため，エンジンの仕様や詳細な動作条件は記載しないが，加熱側の温度は 200℃，冷却側の温度は 20℃として計算を行った。

図 2 にシュミット理論により求めた P-V（圧力−体積）線図を示す。計算の結果，理論熱効率は 38%，理論出力は 950W であった。ただし，実際の出力は熱交換器の能力や再生器の効率，内部摩擦やディスプレーサによる損失などにより理論値の半分程度 [2] となる。しかしこれを

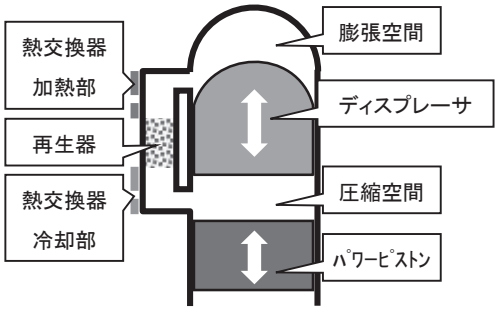

図 1　β型スターリングエンジン

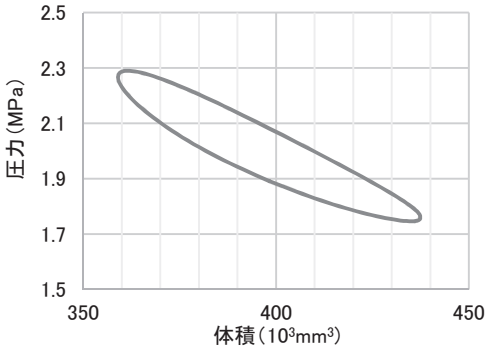

図 2　開発中のスターリングエンジンの P-V（圧力−体積）線図

* 中越技術支援センター

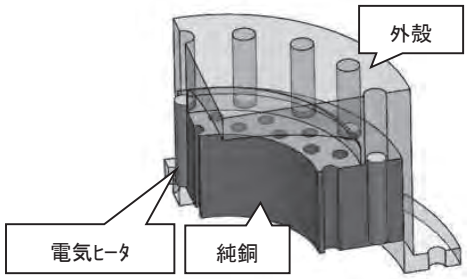

図 3　固体型熱交換器による実験装置

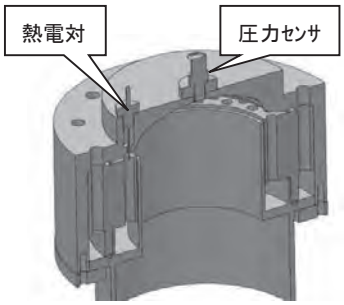

図 4　エンジン内部状態測定センサーの設置

考慮しても開発中のスターリングエンジンは500W に近い出力を発揮できる可能性がある。

3.　運転中のエンジン内部状態の調査

作動ガスの加熱に使用されているサーモサイフォン型熱交換器は，現在未完成のため所定の伝熱能力を発揮できていない。このような状態でエンジンの内部状態（作動ガスの圧力変動，熱交換器出入り口と再生器での温度）を測定すると，それがエンジン自体の問題なのか，熱交換器の能力不足によるものなのか切り分けが困難である。そこで本研究では，高い熱伝導率をもつ純銅で伝熱を行う熱交換器を考案した。図 3 に概略を示す。装置は円筒形状であるが，構造をわかりやすくするため，1/4 モデルで示してある。本装置は外周に取り付けられた電気ヒータで純銅を加熱し，内周穴を通過する作動ガスと熱交換を行う。設計においては，有限要素法シミュレーションによる伝熱解析を行い，ヒータの温度を 215℃に制御することで，内周の穴から合計 5kW の熱が作動ガスに供給されても，内周穴壁面の温度を 200℃に維持できることを確認している。すなわちこの装置は，サーモサイフォンが所定の能力を発揮した状態を再現できる。

本装置で発電実験を行った結果，同形状・同条件のサーモサイフォン型熱交換器に対して，2.5 倍の出力（約 90W）が得られた。これにより，固体型熱交換器がその機能を発揮できていることと，現状の熱交換器がその能力を十分に発揮していないことが確認できた。

次にこの実験装置を改造し，運転中の内部状態を測定する。図 4 に構想図（装置断面）を示す。図 1 に示す膨張空間頭頂部に圧力センサを取り付ける。また，作動ガスが通過する熱交換器加熱側出口には熱電対を設置する。熱電対はこの他にも再生器中央部と冷却側熱交換器出口に同様の方法で設置する。

今後の予定としては，上記装置を製作し，運転時の基礎的なデータを収集を行う。その後，圧縮空間側の圧力と，パワーピストンとディスプレーサの位相も測定できるようにさらに装置を改造する。これによってスターリングエンジンの運転時の内部状態を完全に測定し，性能向上の方向性を明らかにすることを目指す。

4.　結　　言

（1）シュミット理論による解析を行った結果，開発中のスターリングエンジンは 950 W の理論出力を発生する。従って，実機においても 500 W に近い出力を発生できる可能性がある。

（2）固体型熱交換器を製作して発電実験を行った結果，サーモサイフォンの 2.5 倍の出力が得られた。今後は装置を改造し，運転時内部状態の測定を目指す。

参考文献

1）山下巖ほか，“スターリングエンジンの設計”，パワー社，2000，pp.42.

2）山下巖ほか，“スターリングエンジンの設計”，パワー社，2000，pp.70．pp.223.