

高性能スターリングエンジンの開発 — プロジェクト「加熱器・冷却器を一方向にバイパスするスターリングエンジンの開発」の進捗

原村 嘉彦*

Development of high-performance Stirling Engine — Project research "Stirling Engine with Uni-directionally Bypassed Heater and Cooler"

Yoshihiko HARAMURA*

1. 緒言

スターリングエンジンは、等温圧縮・等積加熱・等温膨張・等積冷却の基本サイクル（図1の1-2'-3-4'-1）によって構成される、ガスを作動流体とするピストン式外燃機関である。壁を通して作動ガスの加熱・冷却を繰り返すが、壁を加熱・冷却することによる熱源間の熱の流れをなくすために、作動ガスは高温部と低温部に分け、等積過程はこの間で作動ガスを移動させることで実現する。サイクルの4つの過程が十分ゆっくり起これば、等積冷却で作動ガスから取り出した熱（図1の4'-1の曲線とS軸とで挟まれた部分の面積）を積層金網などで構成される再生器内の蓄熱材に蓄え、等積加熱で再生利用する（図1の2'-3の曲線とS軸とで挟まれた部分の面積の熱を作動ガスの与える）ことができ、それが理想的にできれば、理論上最高のカルノー効率と同じ効率が得られる。しかし、高い出力（動力）が要求される実際のエンジンでは、各過程を短時間で起こすために、圧縮・膨張過程は等温とはほど遠く、作動ガスへの熱の授受を確保するために、再生器の両側に高温と低温の熱交換器（ヒータとクーラ）を設置する。これは細管で構成されることが多い。

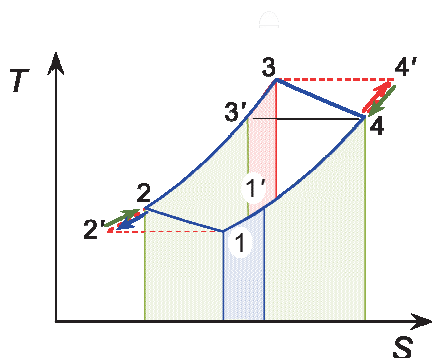


図1 熱力学サイクルのT-S線図

しかしヒータ・クーラの設置は、問題も引き起こす。膨張とその直後の冷却過程では、膨張で温度が下がった作動ガス（図1の4）が、ヒータ内で加熱された後再生器内で冷却され、クーラで最終的に低温熱源温度まで下がって低温空間に入る。図1の4-4'の加熱と4'-4の冷却は相殺されるので、サイクル的に意味がないが、それに関わらず流動抵抗を生む。圧縮とその後の加熱過程でも同様である。その結果、サイクル当たりに取り出せる仕事は減少し、さらにサイクル論的に再生される熱量は4-1'とS軸で挟まれる面積（=2-3'とS軸で挟まれる面積）に減少する。この2つの原因による効率の減少を極力抑えることが、高性能エンジンの実現で重要である。

に低温熱源温度まで下がって低温空間に入る。図1の4-4'の加熱と4'-4の冷却は相殺されるので、サイクル的に意味がないが、それに関わらず流動抵抗を生む。圧縮とその後の加熱過程でも同様である。その結果、サイクル当たりに取り出せる仕事は減少し、さらにサイクル論的に再生される熱量は4-1'とS軸で挟まれる面積（=2-3'とS軸で挟まれる面積）に減少する。この2つの原因による効率の減少を極力抑えることが、高性能エンジンの実現で重要である。

2. 本研究の方針

旧来から、等積加熱時にクーラを、等積冷却時にヒータを通らずに直接再生器に導入すること（一方向のバイパス）でこの相殺する伝熱を抑制する提案なされている。しかし、良好な成果を得ていない。その原因は、膨張・圧縮による温度変化を抑える工夫がされず、その結果再生される熱量が極端に小さくなったためと推定される。そこで本研究は次のようなステップを踏んで研究を進めている。

(1) 膨張空間の壁面熱伝達の把握

膨張空間に流れ込む断面面積を縮小して流速を上げ、それによって伝熱をどの程度まで促進できるかを調べる。これによって、ヒータ・クーラの容量を最小化する。

方法としては、実験によるものと市販のCFD（数値流体力学）ソフトウェアによる方法をとる。膨張空間（高温空間）に絞ってそこでの熱伝達特性を調べる。

(2) 一方向にバイパスするエンジンのシミュレーション

前項の結果を踏まえながら、1次元（ヒータ・再生器・クーラに沿った向きに温度が変化すると仮定する）解析によって、流動抵抗も考慮に入れた熱力学サイクルのシミュレーションを行う。これを通して最適なヒータ・再生器・クーラの容積・流路寸法が決定できる。

(3) エンジンの設計・製作と動作確認

前項で決定した容積・流路寸法を持つエンジンを製作し、特性を確認する。

3. 2017年度の成果

3.1 壁面熱伝達に関する成果

3つのステップのうち、2017年度は(1)と(2)を進めた。(1)に関する

*教授 機械工学科
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

る CFD 解析では、1 次元解析を併用し、CFD で求まる壁面熱伝達を 1 次元解析に適用して膨張空間への流入流出の質量流量と温度を計算し、それを CFD の境界条件とする方法をとった。これを繰り返して壁面温度を 900K とした場合の壁面からの伝熱を求めた。結果は日韓熱流体工学会議[1]とスターリングサイクルシンポジウム[2]で発表した。図 2、図 3 には、論文[2]の結果の一部を示す。加熱過程 ($210^\circ < \text{位相} < 270^\circ$) では、ガス温度が壁温より高い状態から下がってきて熱が入り始めることがわかる。

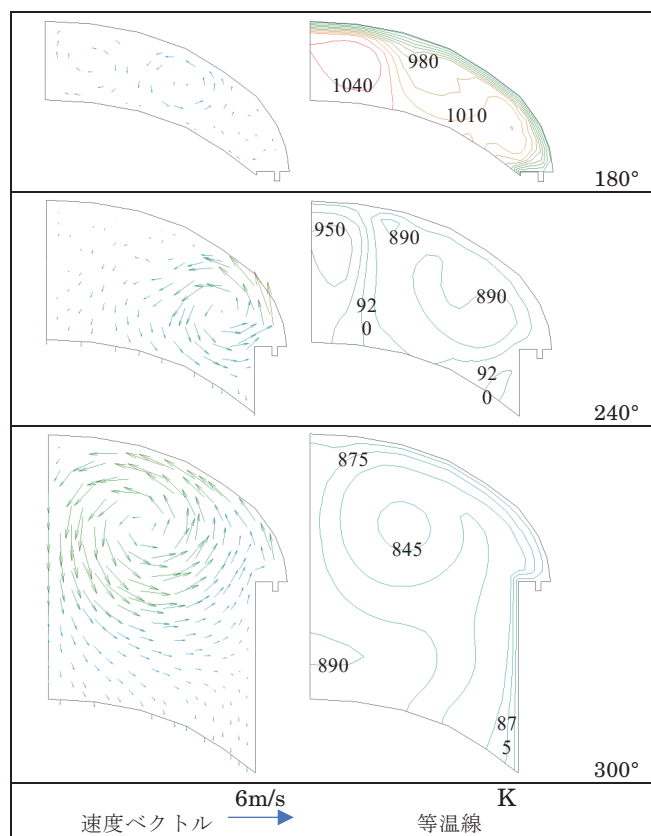


図 2 膨張空間の速度と温度分布の変化 (解析結果)

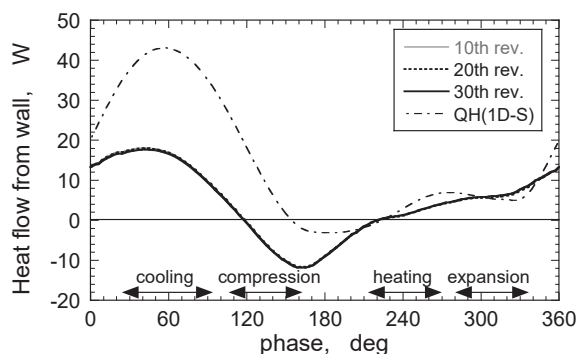


図 3 壁面における熱の流れ (解析結果)

(1)に関する実験は、膨張空間の内面に幅 0.4mm のニッケル箔 (温度センサを兼ねたヒータ) を 25 本貼り、その 1 つを定温度型流速計のシステムを使って通電加熱する方法で行っている。熱流束の分布、それを積分して求めた伝熱量は、図 4、5 のようになる。吹き出し口そばの円筒面における伝熱が大きいことがわかった。国際スター

リングエンジン会議[3]で発表する。

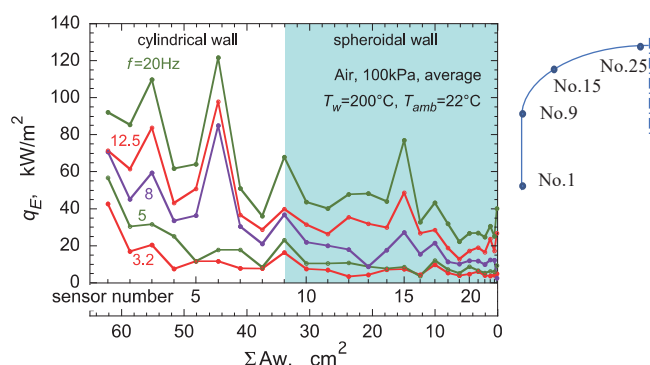


図 4 膨張空間壁面における熱流束分布 (実験結果)

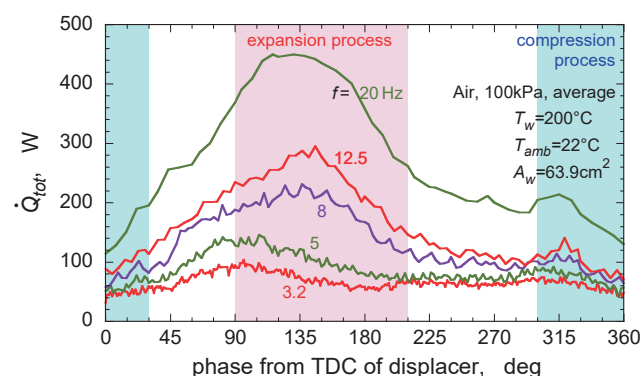


図 5 膨張空間に加えられる熱量 (実験結果)

3.2 シミュレーションに関する成果

従来から行ってきた、質量とエネルギー保存から圧力と温度の変化を求め、それに流動抵抗を加味する方法を、バイパスがあるヒータ・クーラに適用する。流動抵抗による並列流路の質量分配がまだ完成していない。

3.3 プロジェクトメンバーの活動

2 月 24 日に、研究の方針、進捗状況の報告、意見交換を行った。特に、試作エンジンの駆動機構についての意見交換が有意義だった。

4. むすび

今年度は、一方向にバイパスするエンジンのシミュレーションを完成させ、実機の製作に向けて準備したい。

文献

- [1] Y. Haramura and K. Yabe, Heat Transfer on the Wall of Stirling Engine Expansion Space, Ext. Abstracts 9th JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conf., TFEC9-1384 (Okinawa, 2017. 10).
- [2] 原村嘉彦, 膨張空間壁面における熱伝達のシミュレーション, 第 20 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.57-60, (日野, 2017.11).
- [3] Y. Haramura, Heat Transfer on the Expansion Cylinder Wall, Proc. 18th International Stirling Engine Conf., pp.197-204, (Tainan, 2018.9).