

## 公益信託エスベック地球環境研究・技術基金 平成 21 年度 助成金研究報告書 (概要)

国立大学法人 大分大学  
加藤義隆

研究テーマ：温泉等の低温熱源で駆動する普及可能なスターリングエンジンの開発  
期間：2009 年 8 月末から 1 年間

## 1. 研究成果の概要

本研究では、机上サイズの装置で温水から 100W を出力する低温度差スターリングエンジンの実現に向けた課題抽出を行なった。当該研究期間中の成果は、既存の低温度差スターリングエンジンの基本構成を維持したまま大型化しても出力が向上しないことが明らかになったことと、熱力学的な要因に基づくトルク変動の改善のためにスターリングサイクル分野では採用例の無いカム機構の導入をして試作機の自立運転に成功したことである。以上の 2 件は 2010 年 12 月 7・8 日に東京都大田区で開催される第 13 回スターリングサイクルシンポジウム (企画：日本機械学会エンジンシステム部門) において口頭発表を行う予定であり、口頭発表終了後に学術論文として投稿する準備が進行している。

なお、単純な大型化で出力が期待するほど向上しなかった件については、既存の低温度差スターリングエンジンの基本構造を変える必要があると判断した。この件については新たな伝熱面形状を提案するために数値計算で評価を試みている。具体的には、ディスプレイサの往復動の向きが、従来の基本構成では伝熱面に対して垂直だが、伝熱面に対して平行にすることを考えている。

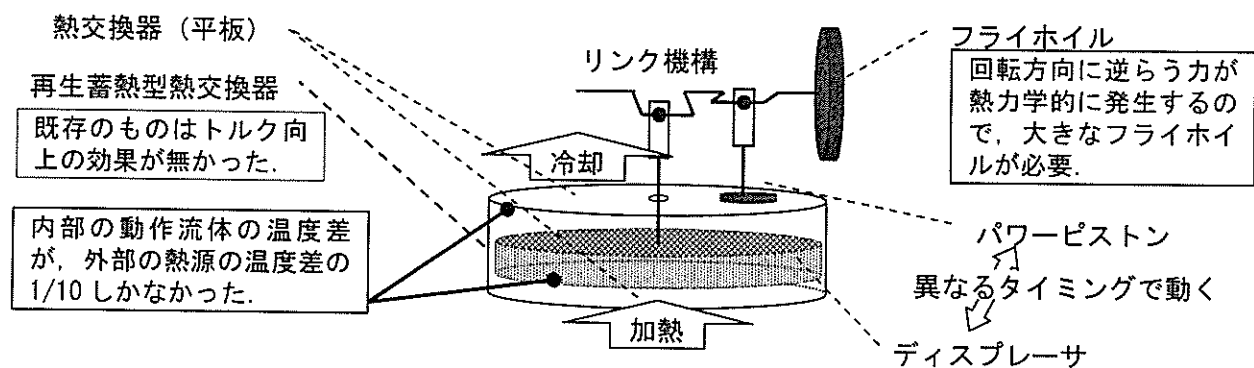


図 1 20 年以上主流である低温度差スターリングエンジンの基本構造と課題

## 2. 背景

一連の活動の目標は 100W 規模の出力を卓上サイズの LTDSE を安価に実現することである。

100W 規模の LTDSE の用途は、例えば日本においては風呂の残り湯で夜間の照明の一部を賄うようなことも可能であり、また途上国の無電化地域における照明用電力の供給と共に技術移転による自立的な工業化の切欠を与えることも期待できる。

低温度差スターリングエンジンは 1800 年代から歴史のある燃焼熱を利用するスターリングエンジン

と異なり、トルクが弱く、装置の大きさに対して出力が弱い。実用化には出力の向上が不可欠である。図1の構造は、100℃未満で動作する低温度差スターリングエンジンの黎明期から20年以上主流だが、出力向上の取り組みは摩擦の低減および大型化や動作流体を高圧のヘリウムに変更する事などに限られていた。

低温度差スターリングエンジンの製作に高い工作精度や技能が不可欠だと信じられたことは、研究の障害要因であった。個人の趣味程度の工作の中に高校課程の数学や物理を用いるエンジニアリングの要素を持たせた教育プログラムの作成を試み、低温度差スターリングエンジンを手作りし、設計・製作・要素試験の方法を含めた冊子(\*)を作った。スターリングエンジンには用途において分類可能で、実用化を目指すものと教材があるが、その取り組みの中では教材として扱ってきたが、手作りしたモデルスターリングエンジンの性能評価や性能向上のためのデータ収集をするための要素試験も教育プログラムの一環として作成した。この要素試験の中で、図1の基本構造では20℃の温度差から100Wを出力するのに、掃気容積が70リットル以上必要だと判断するデータを得た。原因は熱交換が不十分なことで、これを改善することでトルクは約9倍の改善が見込める。

(\* 加藤, 高校で学ぶ「ものづくり」の工学の入門, 日本機械学会 2010 年度年次大会市民フォーラムの配布物, 2010 年, 184p.)

### 3. 経過

表1の諸元を示す低温度差スターリングエンジンを試作した。従来のモデルスターリングエンジンより10倍の規模の掃気容積がある。回転の速さは3秒間に1回転で、パワーピストンが下がる時に角速度が落ち、上がる時に角速度が増加するという結果が出た。この時の伝熱面は高温側が79℃で低温側が32.3℃だった。教材用の玩具として取組んできたモデルスターリングエンジンに較べて、フライホイールを回転させたときの挙動などから機構部分における摩擦損失は少ないが、無負荷の自立運転における機関回転数の速度は遅くなった。トルクの計測装置を製作したが、計測する程のトルクは生じなかった。

表1 1リットルを超える掃気容積を持つスターリングエンジンの諸元

Buffer Pressure		0.10 Mpa
Phase Angle		90°
Power Piston	Diameter	3.26 cm
	Stroke	8.0 cm
	Cross Section Area	8.3 cm <sup>2</sup>
	Stroke Volume	66.8 cm <sup>3</sup>
Displacer	Shape size [cm]	Rectangular 22.0 × 19.8 × 0.5
	Stroke	4.5 cm
	Cross Section Area	435.6 cm <sup>2</sup>
	Stroke Volume	1960 cm <sup>3</sup>
Displacer Rod Cross Section Area		0.7 cm <sup>2</sup>
Height of Dead Space in Displacer Chamber	Compression Area	1.9 cm
	Expansion Area	0.4 cm
Path Between Piston Cylinder and Displacer Chamber		8.3 × 0.1 cm <sup>3</sup>

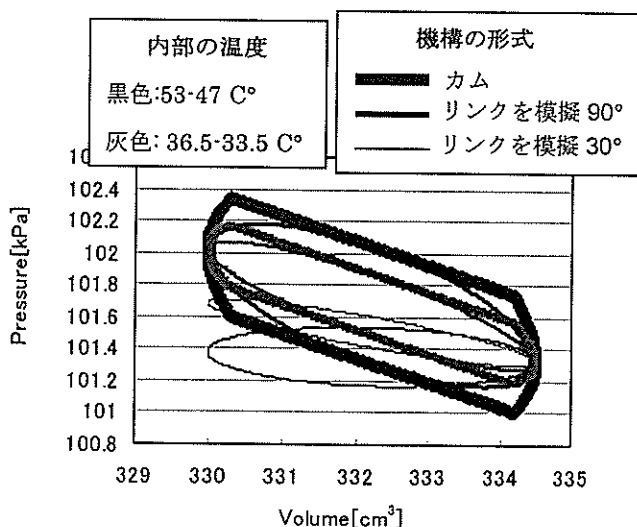


図2 等温モデルによる熱力学的な比較

機関回転数については、上述の結果から摩擦を減らすだけで改善しないことが確認できた。ただし既往の研究では700rpmの報告もあり、市販の教材でもフリーピストンという形式で1秒間に4から5サ

イクルの周期で駆動するものがある。これらの形式は外部の振動に弱く運転の安定性に欠けるところがあった。リンク機構を用いた形式では、運転の安定性が比較的良いが、熱力学的な駆動力の変動が問題であった。数値計算によりその比較を行なったのが図2である。動作流体の圧力とバッファ圧力の差はピストンの駆動力である。その駆動力はバッファ圧力よりも動作流体の圧力が高いときは容積を増大させる方向に働き、バッファ圧力の法が高い場合は容積を減少させようとする力になる。リンク機構を模擬した計算ではピストンとディスプレイサの位相差を一般的な90度と報告者が教材に採用している30度の比較をしているが、ある程度の温度差を確保しておくとも30度ではほぼサイクルの進行全体においてピストンにかかる熱力学的な力はサイクルの進行方向に対するものだが、死点近傍で力が弱くなる傾向にあった。90度の位相差を設けたリンク機構ではサイクルの進行を妨げる力が必ず発生することが分かる。以上からリンク機構では回転数の伸びに限界があると判断できた。

そこでこれまでスターリングサイクル分野で採用例の無かったカム機構を導入することにした。図2に示す数値計算の結果は、理想的なスターリングサイクルに近い形状の $p-V$ 線図が得られることを示している。これを図3の概念図に近い構成で試作機を製作し、自立運転に成功した。リンクは重力でカムに追従させる。ただし面圧を抑制するため、バランスを調整した。またディスプレイサのストロークを規制してディスプレイサが高温側に位置する間はロッカアームがカムに触れないようにして、摩擦を抑制した。機構の慣性力の問題が生じるものの、今後も検討する価値があると判断できた。

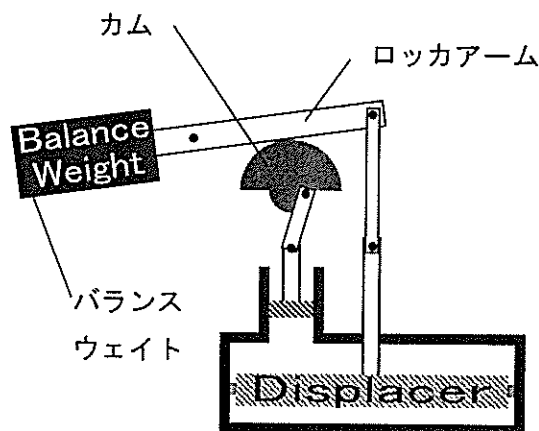


図2 カム機構を用いた構造の概念図

#### 4. 今後の展望

本報告書が示すように、当該研究期間中に目覚ましい研究成果は無かった。低温度差スターリングエンジンの性能が熱力学的に大幅に向上する余地があるが、現実には出力が向上しなかった。その要因として従来の基本構造に問題があると判断した。現在、新しい伝熱面の形状の案が生じたため、その形状の伝熱特性について検討中である。出力向上の余地は大きいですが、既存の取組みの延長では限界があり、その実現にはまだアイデア頼みの試行錯誤が必要な段階である。

#### 5. 謝辞

当該分野はまだ十分な研究がなされておらず、試行錯誤が必要な状況であります。十分な実績もない取り組みに対して助成して頂いたことに感謝します。研究期間は終了しましたが、この助成によって今しばらく研究活動は継続可能です。ありがたく研究開発を進めさせて頂きます。研究成果の概要で言及した口頭発表の原稿と投稿準備中の論文は掲載後に送付させて頂きます。