

模型スターリングエンジンカーの設計・製作

—スターリングテクノラリーに向けた取り組み—

生産技術科 奥田 展大

Design and Production of a Model Stirling Engine Car

—Initiatives for the Stirling Techno-Rally—

Nobuhiro OKUDA

概要 ポリテクカレッジでは、授業で得た知識と技能・技術を駆使して、設計から製作までの一連のプロセスを通して、ものづくりに関する集大成となる課題実習(総合制作実習)を行っている。本稿は、総合制作実習のテーマとして2017年度から2018年度の2年間で取り組んできた「模型スターリングエンジンカーの設計・製作」について、現況を報告するものである。

1. はじめに

スターリングエンジンは、シリンダ内に密封された作動ガス(空気、ヘリウム、水素など)を外側より加熱・冷却することにより、動力を得る外燃機関のエンジンである。ガソリンエンジンやディーゼルエンジンなどの内燃機関の台頭によりスターリングエンジンは影をひそめ、その間技術的な進歩はなかったが、21世紀に入り、CO₂削減やコージェネレーションによってスターリングエンジンの研究開発が盛んになり、再び脚光を浴びることとなった。¹⁾

一方、工業高校やポリテクカレッジ、大学などの教育機関では、ものづくり教育の題材としてスターリングエンジンが取り入れられている。特に模型スターリングエンジンは構造が簡単なため、設計・製作が比較的容易であると同時に、熱が機械的な仕事に変換される仕組みが理解しやすいという特徴がある。また、独自の発想でオリジナルの模型スターリングエンジンを設計し、自らの手で製作することにより、設計から製作までの一貫したものづくりについて、総合的な技術を習得することができる。

さらに、そのエンジンを動力源として、車体や機体、船体などの“動く模型”に利用することにより、さらなるものづくりの面白さや発展性を実

感できる。²⁾

当校においても2017年度から総合制作実習の一環としてスターリングテクノラリー技術会主催で開催されているスターリングテクノラリー(以下、本競技会という)に向けた模型スターリングエンジンカー(以下、車両という)の設計・製作に取り組んでいる。

本稿は、2017年度から2018年度の2年間における取り組み内容について報告する。

2. スターリングテクノラリーの概要³⁾

本競技会は、毎年11月にものづくり大学(〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)を会場に、北海道から沖縄までの工業高校、高等専門学校、ポリテクカレッジ、大学、一般などが参加し、自作スターリングサイクルの性能とアイデアを競う大会である。

本競技会の目的は、青少年の工学に対する興味・関心を喚起し、スターリングエンジンとその関連技術の発展・向上を期して、主催者・参加者全員が協力して行う技術的競技である。

現在、本競技会には人間乗車クラス、RCクラス、ミニ宙返りクラスなど計8つのクラスがあり、その中でも、ポリテクカレッジや大学が多く参加

している RC クラスに出場できる車両の設計・製作を行うことにした。

出場を目指している RC クラスは、競技者が車両を遠隔操縦し、図 1 に示すように約 12m の間隔に置かれた 2 つのコーンを反時計回りに周回してそのタイムを競うものである。また、車両の大きさはコースを安全に周回できるサイズとなっている。

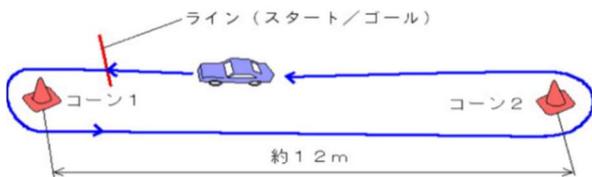


図 1 RC クラス走路

3. 2017 年度の車両について⁴⁾

3.1 エンジン部の設計

2017 年度は、ゼロからのスタートであったため、文献⁵⁾にある設計計算例を参考に、相似形設計を実施した。まず、設計条件（ピストン直径、ストローク、出力）を設定し、次に加熱量、回転数、加熱ヘッド長さ、冷却部長さ等の順に計算を行い、各パラメータを決定した。このとき、各パラメータの計算を Excel を用いてデータベース化させることにより、設計条件の変更があった際、即座に対応できるようにした。

参考にしたエンジンの特徴として、ピストンとシリンダにガラス製注射器が用いられている。注射器の使用は、作動ガスの漏洩を極力少なくするとともに、摺動部における摩擦低減を図るためである。そこで、文献と同様、ピストンとシリンダには市販のガラス製注射器を使用した。

3.2 車体部の設計

車体部の設計に当たっては、まず市販されているラジコンカーを参考に前輪操舵部の設計を行った。市販されているプロポ（送信機）を操縦して、図 2 に示すサーボを旋回させることにより、それと連結しているリンク機構を介して前輪を操舵する仕組みとなっている。

次にエンジンから得られた動力を後輪へ伝える

ため平ベルトを用いて駆動させる方法を採用した。このとき、図 3 に示す 2 ヶ所の調節ねじを回すことにより車軸を前後へ可動させ、ベルトのテンションを調節できるようにした。なお、図 4 に 2017 年度に設計した車両モデルを示し、表 1 にその車両の主要諸元を示す。

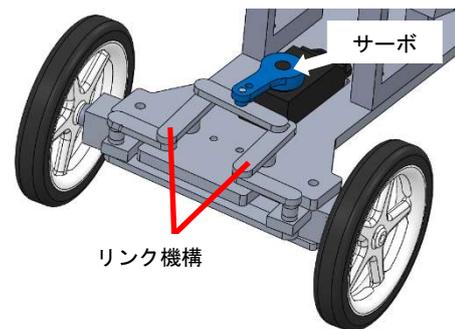


図 2 前輪操舵部

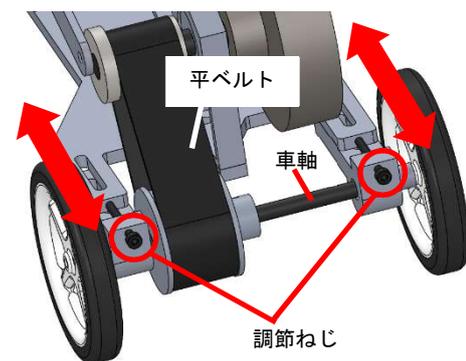


図 3 後輪駆動部

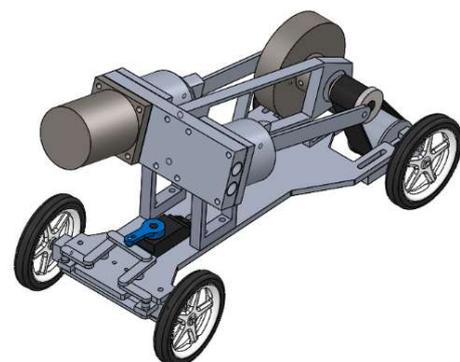


図 4 車両モデル (2017 年度)

表1 車両の主要諸元 (2017年度)

エンジン形式	α形
ボア×ストローク	φ35.7×20mm
出力/回転数	10W/1550min ⁻¹
加熱形式/冷却形式	ガスバーナ/空冷
車両質量	2950g
全長×全幅×全高	340×150×190mm
ホイールベース	265mm
トレッド	135.5mm

3.3 試運転

普通旋盤、フライス盤、NC旋盤、マシニングセンタ、ワイヤ放電加工機など実習場にある工作機械を用いて部品加工を行い、組み立て調整後、試運転を行った。結果としてエンジンは稼動しなかった。稼動しなかった原因としてガスバーナで加熱ヘッドを加熱した際、その部分からエンジン全体に熱が伝わりアルミニウム製ピストンホルダが膨張し、ガラス製ピストンを圧迫したことにより図5に示す通り、ピストン部分にひび割れが入ったため稼動しなかったことが考えられる。

なお、図6に2017年度に製作した車両の外観を示す。



図5 ピストンのひび割れ



図6 製作した車両の外観 (2017年度)

4. 2018年度の車両について⁶⁾

2017年度の車両はエンジンが稼動しなかったため、走行させることができなかった。2018年度においては、まずその原因を追究し、問題点を洗い出しながら再設計を行い、改善案を取り入れた新しい車両の製作を行うことにした。

4.1 2017年度の問題点

問題点として以下の3点が挙げられる。

・問題点①

ガラス製ピストンとアルミニウム製ピストンホルダでは、線膨張率(ガラス: $8.5 \times 10^{-6}/K$ 、アルミニウム: $23 \times 10^{-6}/K$)に差がある。前述の通り、それを無視して加熱を行ったため、ピストン部分に大きなひび割れを起こしていた。

・問題点②

2017年度の車両は、エンジンから後輪への動力伝達に平ベルトが用いられていた。しかし、平ベルトはスリップを生じる恐れがあり、出力の小さいスターリングエンジンと組み合わせるのは不適切である。

・問題点③

車両質量として、2017年度の車両は約3kgであった。非力なスターリングエンジンにとっては非常に重く、車両を走行させるのは困難である。

これらの問題点を踏まえ各部の再設計を行った。

4.2 エンジン部の設計

問題点①を解決するため、2017年度のガラス製ピストンからアルミニウム製ピストンに変更した。これは、ピストンホルダと同じ材質にすることで線膨張率の差を軽減している。同様に、ピストン自体の膨張も考え、シリンダもアルミニウム製に変更した。こちらは更に冷却フィンをつけることで冷却性能を向上させ、エンジンの効率化にも努めている。

2018年度のエンジンは以上のような改善点を加え設計し直した。

4.3 車体部の設計

問題点②を解決するため、平ベルトではなくタイミングベルトに変更した。タイミングベルトは平ベルトに比べ、より高効率でスリップもない、などといった点を加味し採用した。

次に、問題点③を解決するため、車体の構成部品に対し、強度を残しつつ肉抜きを行った。加えて、走行時の直進安定性と旋回性能を上げるため、ホイールベースの長さを変更した。これは、前輪軸と後輪軸との間の距離（ホイールベース）と左右のタイヤの中心間距離（トレッド）の比を黄金比 1.618 に近づけるほど走行が安定するという定説を基に調整を行った。2018年度の車両では、シャーシ部品を小型化することで、ホイールベース・トレッド比は 1.642 となっている。さらに、全長が 2017年度に比べ 40mm 短くなったことで軽量化という面でも前進し、結果として、約 1kg の軽量化に成功した。なお、図 7 に 2018年度に設計した車両モデルを示し、表 2 にその車両の主要諸元を示す。

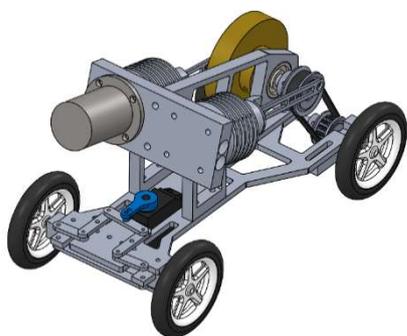


図 7 車両モデル (2018年度)

表 2 車両の主要諸元 (2018年度)

エンジン形式	α形
ボア×ストローク	φ30×20mm
出力/回転数	5W/1096min ⁻¹
加熱形式/冷却形式	ガスバーナ/空冷
車両質量	2098g
全長×全幅×全高	300×150×170mm
ホイールベース	222.5mm
トレッド	135.5mm

4.4 試運転

各部品を製作後、組み立て調整を行い、試運転したところ、389min⁻¹でエンジンを回転させることができた。しかし、表 2 で示した設計上のエンジン回転数には遠く及ばなかった。

その原因として考えられるのが、作動ガスの漏出である。2017年度のエンジンではピストン・シリンダ部品として、市販のガラス製注射器を使用し、これにより高い気密性を実現していた。それに対し、2018年度に製作したアルミニウム製ピストン・シリンダでは、クリアランスを 0.01mm としたが、作動ガスが漏れている可能性があった。そこで、図 8 に示すラビリンス構造というものを取り入れることにした。これは、ピストンに意図的にわずかな切り込みを入れ、内部から逃げようとするガスが渦を巻くような流路構造を作ることによって逃げるガスの圧力損失が大きくなり、結果、漏れ量が減少するといったものである。また、円周方向に圧力を導くことによって、ピストンへのセンタリング効果が生まれることも期待できる。

図 9 に示すように、実験的に幅 1.5mm、深さ 1mm の溝を 10mm 間隔に設け、試運転を行った。その結果、600min⁻¹まで上昇させることができた。

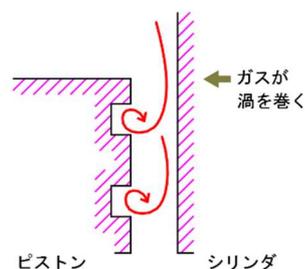


図 8 ラビリンス構造

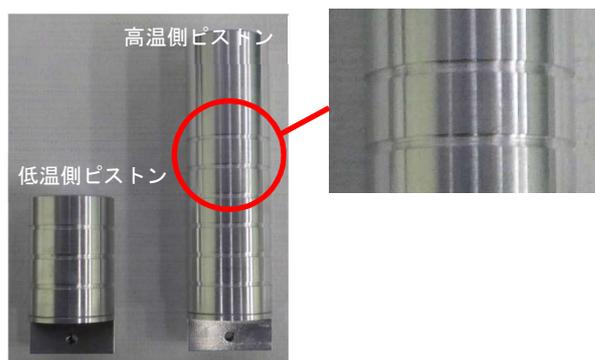


図 9 ラビリンス構造を用いたピストン

さらに、図 10 の示すように高温側ピストンのみピストン上部の直径を小さくし、再度、試運転を行ったところ、 820min^{-1} まで上昇させることができた。

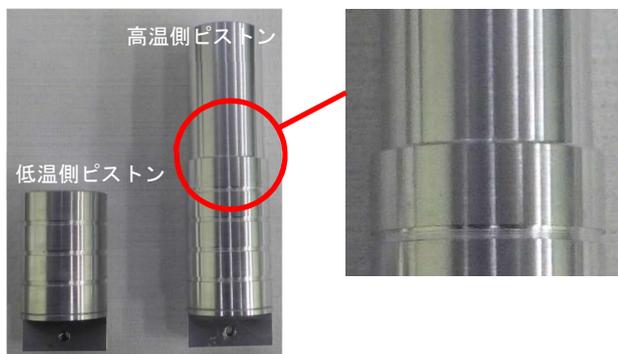


図 10 ピストン上部のみ直径を変えたピストン

4.5 走行実験

エンジン始動後、エンジン回転数が 800min^{-1} に達したことを確認し、地面にタイヤを設置させ、走行実験を行ってみた。残念ながら、走行するまでには至らなかった。走行できなかった原因として、車両質量に対して、エンジン出力が足りなかったことや熱源（ガスバーナ）を搭載していなかったことによる熱量不足など幾つか考えられる。なお、図 11 に 2018 年度に製作した車両の外観を示す。



図 11 製作した車両の外観（2018 年度）

5. おわりに

本稿では、2017 年度及び 2018 年度に取り組んだ車両の設計・製作について報告した。

現時点では、エンジンのみ稼働させることができたが、地面設置状態での走行は未達成である。

しかしながら、これまで学生たちは正解のある課題を与えられ、繰り返しの練習から技能・技術を習得してきたが、総合制作実習で初めて正解のない課題を与えられ、自らの自発性を持って試行錯誤を繰り返しながら取り組んだことにより、新たな問題点を発見し、それを解決していく能力が身に付いたと思われる。

そして、設計から製作に至るまでの過程の中で、設計では、設計計算に基づいて自らのアイデアを形にし、材料の特性や機械要素部品の選定などあらゆる知識を使って設計しなければならなかった。また、製作では、特にエンジン性能に左右するピストンやシリンダを加工する際、寸法精度や形状精度及び表面あらさなどを考慮しながら加工工程を検討し、製作を行わなければならなかった。そういった意味で、総合制作実習においてスターリングエンジンを題材として取り入れたことは、機械工学全般を学ぶ上で適したテーマであったと言える。さらに、自ら製作したものが稼動した時、「感動」を味わえることができ、稼動しなかった場合でも“動くもの”を作る「難しさ」を痛感できるテーマでもあった。

今後は、より出力の大きなエンジンを製作し、新たに熱源の搭載方法を検討しつつ、さらに車両全体の軽量化を図りながら走行できる車両を完成させていきたい。

文献

- 1) 菅川清春：スターリングエンジン製作の取り組み。岩手県立産業技術短期大学校紀要，第 16 号，pp. 2-9，2016.
- 2) 浜口和洋，平田宏一，松尾政弘他：模型スターリングエンジン。山海堂，1997.
- 3) スターリングテクノロジー公式サイト
<http://www.stirling.jpn.org/>
- 4) 多々良雄哉，小村幸平，寺岡泰規：スターリングエンジンカーの設計・製作。ポリテクカレッジ島根 2017 年度総合制作発表会概要集，2018.
- 5) 濱口和洋，戸田富士夫，平田宏一：模型づくりで学ぶスターリングエンジン。オーム社，2013.
- 6) 馬庭伸英，陶山航平，表田剛：スターリングテクノロジー大会に向けた車両製作。ポリテクカレッジ島根 2018 年度総合制作発表会概要集，2019.