

外燃機関エンジンの設計・製作

— 総合制作実習からの報告 —

北陸職業能力開発大学校 高橋 茂信

1. はじめに

スターリングエンジンは密封された空気などの媒体を過熱することにより動作する外燃機関のエンジンである。自動車などの内燃機関のエンジンに比べ、低騒音で熱効率も高く排気ガス等が排出されないため、環境にやさしいクリーンなエンジンである。したがって、二酸化炭素ガスの排出増大による地球温暖化の問題に対する対策機器としての資格を十分に備えているエンジンとしての立場から、その設計製作を行うことは、今後重要視される環境問題への関心を高めることに役だつと考えられる。

またスターリングエンジンの製作の工程としては、デザイン、理論計算、要素設計、機械加工、組立、調整等が含まれており、専門課程制御技術科および生産技術科2年間で学んだ技能と技術の集大成となる題材としても適していると考えられる。

そこで本報告では、著者が2003年から2009年まで千葉職業能力開発短期大学校および北陸職業能力開発大学校にて取り組んだ課題について取り上げた。ベースとなる模型スターリングエンジンの設計製作からスターリングテクノロジー参加のための期待の設計製作、といった一連の流れを1年間の総合制作実習の中で実施した。その結果や問題点・今後の改善点を報告する。特に、7年間の中で製作したエンジンの内容と訓練生への指導という2つの観点を重点的にまとめた。

2. スターリングテクノロジー概要⁽¹⁾

2.1 競技会概要

スターリングテクノロジーは、毎年11月に日本工業大学（〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町）を会場に、全国からさまざまなサイズや形式の自作エンジンが集まり競技大会が開催され、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。これは総合制作課題の成果を試すには最適の場である。

2009年11月に開催された第13回スターリングテクノロジーでは、6クラスに分かれ競技が実施された。競技の様子を図1に、クラス分類を表1にそれぞれ示す。



図1 スターリングテクノロジー大会風景

表1 テクノラリークラス分類 (2009年大会)

クラス名称	概要
人間乗車クラス	走路を周回し、1時間以内の走行距離を競う
無線操縦クラス	長円形走路 (25m) 2周のタイムを競う
宙返り耐久クラス	5つの垂直ループを含む走路を周回、周回回数を競う
ミニ速度クラス	周回走路 (約9m) 1周のタイムを競う
3Vクーラークラス	単三乾電池2本を電源とし、5分間の降下温度を競う
100Vクーラークラス	AC100V電源を用い、10Kの温度降下効率を競う

2.2 テクノラリー参加クラスの規定

2003年度より従来のミニクラスへ参加を行っていたが、2009年度からの規定変更を考慮し、無線操縦クラス (以下、RCクラスと表記する)、宙返り耐久クラス (以下、耐久クラスと表記する)、ミニ速度クラス (以下、ミニクラスと表記する) および3Vクーラークラス (以下、クーラークラスと表記する) の4つのクラスへ参加した⁽²⁾。参加クラスの主な規定を以下に記述する。

(1) RCクラス

2009年から新設されたクラスであり、2008年までのノーマルクラスの主な車両規定と同様であり、無

線操縦により操作を行う。規程としては、(1)サイズは自由であるが、走路を安全に周回できるサイズとする。(2)熱源の搭載は自由とすること、とされ、25m×2周の周回時間を競うものとなっている。

(2) 耐久クラス

図2に示すコースで競技を行う耐久クラスの主な車両規定としては、(1)幅105mm以内、高さ90mm以内 (長さは自由) とすること、(2)作動流体は空気を含む不燃ガスであること、(3)冷却は空気または水等を用いること、と規定されている。また熱源は搭載しても問題はないが、耐久性が勝敗を左右する耐久ミニクラスの特性上、熱源を搭載している車両が増加した。

(3) ミニクラス

ミニクラスの規程としては、(1)幅105mm以内 (高さ、長さは自由) とすること、(2)作動流体は空気を含む不燃ガスであること、(3)冷却は空気または水等を用いること、と規定されている。また熱源は搭載しても問題はないが、速度が要求される競技であるため熱源を搭載している車両は少ない。

(4) クーラークラス

クーラークラスは、市販の単三乾電池を2本まで用い、用意された温度計センサをクーラーに取り付けて競技中の温度を測定する。センサはA&D AD1214相当品が用いられ、温度測定箇所へのセン

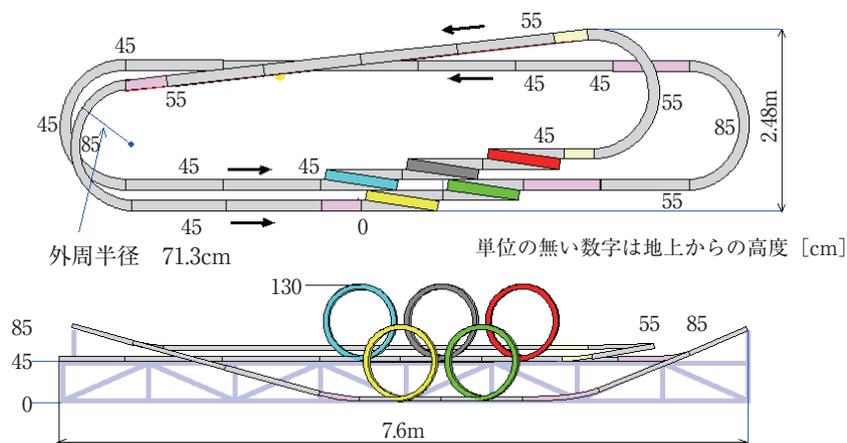


図2 耐久クラス・コース概略

サ設置は競技者自身が行う。

3. 総合制作実習の流れ

本総合制作テーマでは、11月のテクノラリーおよび3月の発表会を見据え、以下表2のような3期に分けた年間スケジュールを計画し、制作実習を行った。

I期ではスターリングエンジンの動作原理を理解し、機構の設計から図面作成までを実施する。II期では大会出場のための機体を製作し、テクノラリーへの参加を目的とする。III期ではテクノラリー参加の反省等を踏まえ、再設計・加工・組立を実施し、改良された2号機を製作し、最終発表で1年間の総まとめを行う。

この3期の実習を通して、スターリングエンジン作製を最低3回行い、学生のアイデアを具体化したり、設計・加工・改善を行ったり、と試行錯誤を繰り返すなかで状況の応じた最善な答えを探し、加えてスターリングエンジンの原理やものづくり全体の流れを理解させることも目的の1つである。

表2 総合制作実習の流れ

I期	4月	スターリング機構の理解 模型スターリングの作成 設計 2次元, 3次元CAD
	5月	
	6月	
	7月	
II期	8月	加工・組立・調整 (1号機)
	9月	
	10月	
	11月	スターリングテクノラリー
III期	12月	設計・加工・組立・調整 (2号機)
	1月	
	2月	
	3月	

4. スターリングエンジン作成方法

スターリングエンジンカーの製作は図3のような流れを基本とした。以下具体的な方法を解説する。

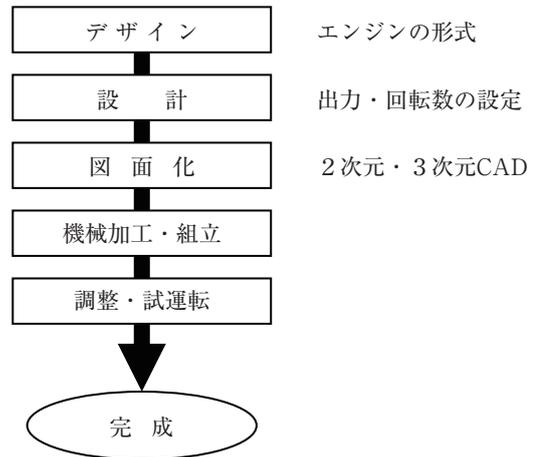
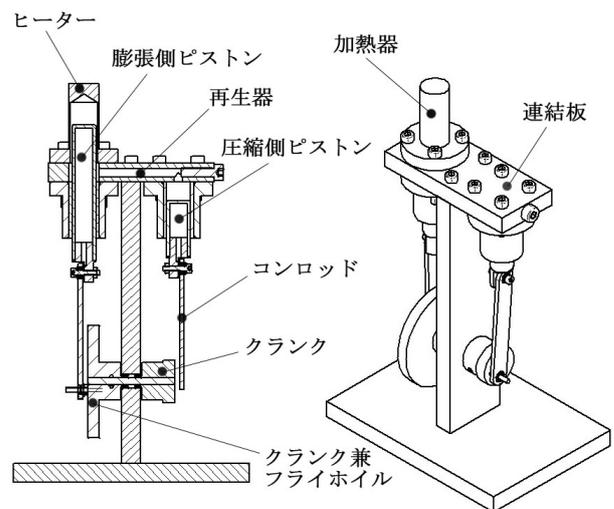


図3 エンジンカー製作の流れ

4.1 デザイン・設計⁽³⁾⁻⁽⁵⁾

文献や資料から、図4に示す模型スターリングエンジン「LSE-01」を参照して設計を実施した。本エンジンは最もシンプルな構造をもつ α 型スターリングエンジンである。膨張側および圧縮側のピストンとシリンダにはガラス製の注射器(3cc, 翼工業



(a) 断面図

(b) 外観図

図4 模型スターリングエンジン「LSE-01」

表3 LSE-01エンジン仕様

エンジン形式	α型 スターリングエンジン
行程容積（膨張側）	0.628 cm ³
シリンダ径×ストローク	φ10 mm×8 mm
行程容積（圧縮側）	0.628 cm ³
シリンダ径×ストローク	φ10 mm×8 mm
加熱形式	ガスバーナー
冷却形式	自然冷却

製）が使用されている。膨張側ピストン上部には、約0.7mmのクリアランスを設けて、ステンレス製のキャップ式ヒーターが設置されている。膨張空間と圧縮空間とはそれぞれのシリンダを連結する板材に開けられた穴によりつながれている。このエンジンはガスバーナー等で加熱することにより、約3000rpmの回転数で稼働する。表3にエンジンの仕様を示す。この模型スターリングエンジン「LSE-01」を製作するための設計確認を行った。

4.2 図面化

設計後、部品図および組立図を、機械加工用の2次元図面（AutoCAD）と、動作・機構確認用の3次元図面（UG-NX1）を2種類作成した。またUG-NX1を使用し動作および干渉チェックを行った後、膨張側および圧縮側ピストン周りとクランク・フライホイール周辺の動作・機構の確認・加工図面などの修正を行った。

4.3 機械加工・組立

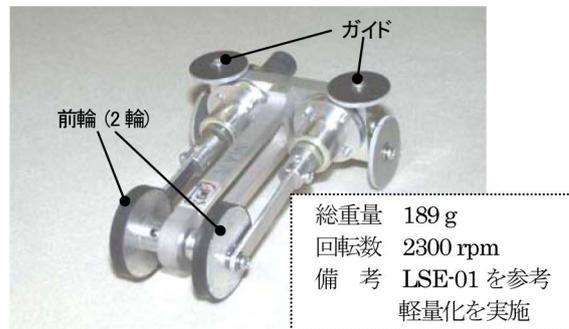
加工は2次元化した部品図面をもとに、実習の復習もかねて普通旋盤、フライス盤、ボール盤から、数値制御加工機であるワイヤカット放電加工機、レーザー加工機を使用した。その後組み立て、機体を完成させた。

4.4 調整・試運転

加工後の部品の中でも特にピストン周りの部品は念入りに洗浄・脱脂・乾燥を施し、組立に用いた。作業は、2つのピストン周辺から、クランク周りを組み上げた。最後に気体密閉用のボルトを締め、試運転を行った。膨張側ピストンの加熱は、エンジン全体の高温化を考慮し、ヒーター全体を熱するのではなく、ヒーターの上部のみを重点的に熱し、エンジンを動作させ試運転を行った。この模型スターリングエンジン作製の流れから、スターリングエンジンの設計、加工や組立て、調整の注意点を理解し、11月のテクノラリー参加車両の製作を同様の手順で行い、競技会に参加した。

5. 結果

テクノラリーへ参加前、参加後の製作機体の変化を2006年から2009年に製作した主な機体結果をもとに解説する。



(a) テクノラリー前



(b) テクノラリー後

図5 スターリングエンジンカーの変化（2006年）

5.1 2003年～2006年⁽⁶⁾

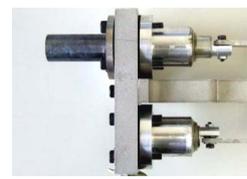
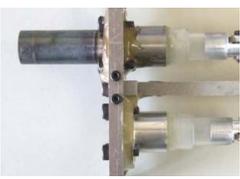
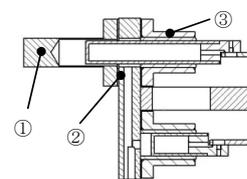
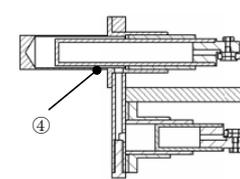
図5には、同一の学生が作成したスターリングエンジンカーを示す。テクノラリー参加前（図5(a)）は、前述したLSE-01エンジンを参考に機体を製作した。機体の80%程度Alを使用した。重量的にはテクノラリーで入賞した他校の機体より重い。テクノラリー参加後に製作した機体（図5(b)）は、4輪から3輪に変更されたことに加え、さらなる軽量化やガイドやつかみ部が増設され、より大会を見据えた機体へと改良が加えられた。

5.2 2007年

機体の軽量化の次に取り組んだ課題として、ピストン周辺の気密性の強化を試みた。2007年度に製作した加熱器周辺の変化を表4に示す。

LSE-01型に代表される α 型スターリングエンジンの膨張ピストン周辺は、①加熱器、②連結板、③シリンダカバーの順序で締結されている。また各部品の間には気密性向上のために不燃性のパッキンが挟み込まれている。この部品点数の多さが、接合部分を増加 → 膨張ピストン内部の気密性の低下 → エンジン出力の低下、を引き起こす原因であると考えた。テクノラリー参加後、部品点数の見直しをねらい、表4中の④に示す「一体型加熱器」を設計製作した。結果接合部分がなくなったことによって気密性は向上し、加えて部品数が5部品から1部品に減少したことにより、大幅な軽量化も達成できた。

表4 スターリングエンジン加熱器周辺の部品変化

	テクノラリー前	テクノラリー後
加熱器周辺		
断面図		

①加熱器 ②連結板 ③シリンダカバー ④一体型加熱器

またテクノラリーに参加した学生すべての2号機は、軽量化や形状の変更など大幅な改良が施されていた。

5.3 2008年

2008年に開催されたテクノラリーから、競技クラスの規定変更から耐久ミニクラスへと変更された。図6にはテクノラリー参加機体を示す。機体は(1)耐久性能を向上させるための高効率化、高出力化、(2)宙返り可能な速度を実現するための軽量化、を目標として作成を行った。

2つの改良目標を達成するために、(1)2007年に行った加熱器周辺の部品点数、形状のさらなる見直し、フレーム周辺に改良および出力軸周辺の軽量化を図った（図中①、②部参照）。(2)熱交換の行われる再生器を連結板内部に設置するのではなく、銅パイプを使い外部に設置し、冷却効率の向上などから高効率化を図った（図中③部参照）。これらの改良の結果、テクノラリーにおいて図2に示すコースのループを2回転させることに成功した。

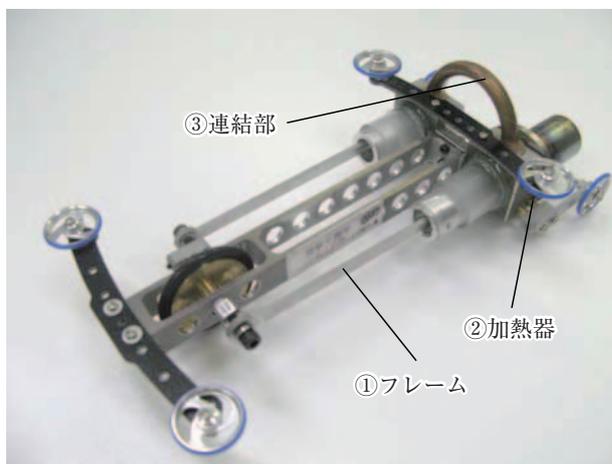


図6 2008年耐久クラス参加機体

5.4 2009年

2009年に開催されたテクノラリーでは、2008年に取り組んだクラスに加えて、新たにRCクラスおよびクーラークラス参加マシンの作成に取り組んだ。この2クラスのマシンについて述べる。

(1) RCクラス

RCクラスは、過去作製したエンジンを参考に熱源および無線操縦部品を設置し作製した。エンジンは20ccのピストンを利用した α 型スターリングエンジンを2基用い、これをT型リンク機構により駆動輪に接続し、走行を試みた。大会参加車両を図7に示す。2008年までのノーマルクラスとの大きな違いは、熱源の搭載に加えて、速度および方向のコントロールが必要な点である。これらの部品が必要なため、このクラスの機体を作成するための部品数は、購入部品、加工部品を含めて合計80点を超え、調整組立には困難を極めた。大会までに何とか完成し、エンジンの動作確認までは行えたが、当日の走行には至らなかった。この点を踏まえ改善点を探した。競技会参加後の改善としては、(1)ギヤ比の再設定と駆動力伝達ギアボックスの改良、(2)ノズルの取り直しおよびガス配管の改良、(3)機体の軽量化、を主な改良点として、現在改良を行っている。

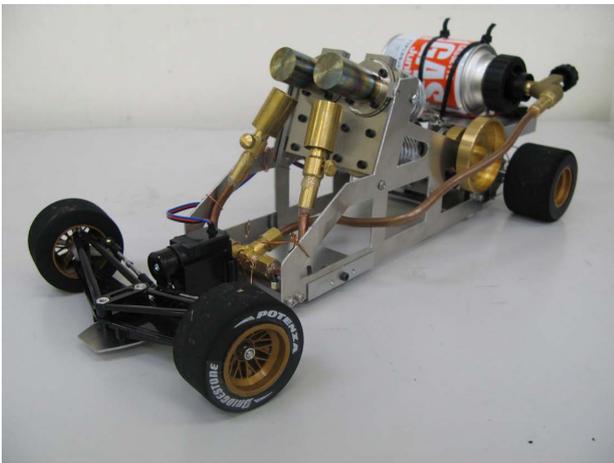


図7 2009年RCクラス参加機体

(2) クーラークラス

クーラークラスは、これまで作製してきたスターリングエンジンとは異なる。これまでのスターリングエンジンは、加熱器に熱を与え発生する温度差をエンジンの動作に利用し、その出力からくる速度や時間を競うものであるが、クーラークラスはスターリング機構を逆に利用し、外部動力等で強制的に動作させたエンジンから温度差をいかに大きく発生さ

せるかを競うものである。

競技会への参加機体は図8に示すとおりである。結果一応の温度低下は果たしたが、センサ設置およびモータの選定、さらなる温度低下のための処理等、今後改善が必要な部品が多い。現在最終発表に向けて、さらなる改良を行っている。

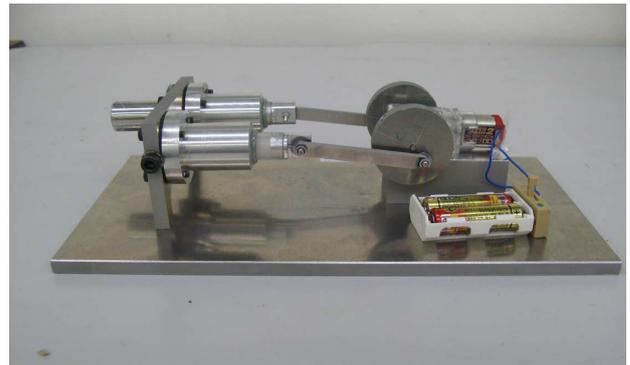


図8 クーラークラス参加機体

6. 考察

6.1 スターリングエンジンについて

テクノラリー入賞を目標とし、さらなる軽量化・気密性の向上に加え、他部品も多数の改良を加える必要がある。さらに(1)設計時に熱解析を実施し、加熱器の最適化を計る。(2)完成機体に対して性能試験を実施し、性能を数値から評価する方法も確立する等が必要であると考ええる。

機体の加工に関しては、これまでは実習の復習も

表5 スターリングエンジンの経過

年度	学生数	テクノラリー			発表会	
		作成	動作	完走	作成	動作
2003	3	1	0	0	3	2
2004	4	4	2	1	4	3
2005	2	2	2	1	2	2
2006	4	3	1	1	3	3
2007	6	3	2	1	5	5
2008	6	5	3	1	4	3
2009	7	6	5	2		

かねて、レーザー加工機、ワイヤ放電加工機のほかに旋盤、フライス盤を使用していたが、高精度の部品を短時間で作成するために、NC旋盤やMC加工機を使った部品加工を行い、短時間での作成から試作を多数回実施するなかで、機体の形状を決定し、テクノラリーでの参加全台完走を目指したいと考えている（表5参照）。

6.2 職業訓練について

テクノラリーに参加する目的は、競技で優秀な成績をのこすことに加え、図面や資料、Webからは読み取ることのできない他の参加者の意気込みやアイデア、加工のレベルなど、参加学生が大会参加を通じて肌で感じ、さらにこの分野における自分のレベルを実感することも目的としている。この学内の作成過程では得ることのできない学外からの刺激という点においても非常に有効であると考えられる。

またテクノラリー参加への準備（9月～11月）を行うなかで、設計制作の一連の流れを把握することができる。この把握により12月から3月の発表会までのⅢ期は、学生が主体となって、より自由な発想をもとに、習得してきた工作機械を駆使しながら、設計製作を行うことができ、改良 → 確認、という体験も短時間の期間で複数回に行うことができる。特に年度終盤には、各製作担当が独自のアイデアを具現化するために少なくなってきた時間を、有効にかつ自主的に作業を行う「時間のコント

ロール」が必要とされる。このため、この間指導員と訓練生という関係で訓練を実施しているというよりも、同じ視点に立ちポイントポイントでの簡単なやりとりで、各自が状況を把握し、改善を行うというより生産現場的なスタイルで作業を行うことで、訓練生本来の自主性を養うことができる。これは非常に有意義な体験であると考えている。

なお次年度も表2に示すような流れを基本として総合制作を計画していく予定であるが、RCクラス的设计・製作に伴う、設計・加工部品点数の増加の影響を考慮して、Ⅰ期を4ヵ月から3ヵ月へ短縮し、大会参加に向けての準備期間となるⅡ期の増加を予定している。またスターリングエンジン製作における技術やポイントなどの継承のため、1年次から製作や大会へ参加する試みや、他校との交流、情報交換も積極的に実施し、更に改善したスターリングエンジンの設計・製作に取り組んでいきたいと考えている。

<参考文献>

- (1) スターリングテクノラリーホームページ
- (2) 数井ほか：『北陸職業能力開発大学校生産技術科・総合制作発表予稿集』，(2008)，19
- (3) 濱口ほか：『模型スターリングエンジン』，(2000)，山海堂。
- (4) 松尾：『スターリングエンジン製作マニュアル』，(2001)，誠文堂新光社
- (5) 山口ほか：『スターリングエンジンの理論と設計』，(1999)，山海堂
- (6) 古俣・古川：『千葉職業能力開発短期大学校制御技術科・総合制作発表予稿集』，(2004)，23