

スターリングエンジンカーの製作

～生徒との6年間の歩み～

岡山県立倉敷工業高等学校電子機械科

藤井利昭

本校では、平成9年度から3年生の課題研究でスターリングエンジンの製作を行っている。平成9年7月に（社）日本機械学会創立100周年記念イベントとして「第1回スターリングテクノラリー」（日本機械学会主催）開催され、平成14年11月16日に第6回スターリングテクノラリーが開催された。

当初は手探り状態であったが、その後6年間にわたり多くの生徒達と試行錯誤を繰り返しながら現在まで至っている。ここではこの6年間の研究内容・製作課程と指導目標等について報告したい。

1. スターリングエンジンとは

「スターリングエンジン」とは、ガソリンエンジンやディーゼルエンジンのように、石油の燃焼による爆発の圧力でピストンを駆動させる内燃機関とは異なり、エンジン内に閉じこめられた気体（空気・ヘリウム等）に外部から熱を加えることによる気体の膨張、冷やすことによる気体の収縮、この気体の熱収縮の性質を利用してピストンを駆動させる外燃機関である。

このスターリングエンジンは、1815年にイギリスの牧師ロバート・スターリングによって発明され1829年若干の実用化がされたが、やがて他の機関の進歩とともに廃れてしまった。しかし、1973年、第1次オイルショックが起こり、自然環境に優しいエンジンとして再び注目されてきた。

それでは、内燃機関と比べ、どのようなメリットがあるかと言うと、

理論的に熱効率がきわめて高いエンジンであり、省エネルギー時代に向いているエンジンである。

外燃機関であるので、熱源には石油以外の太陽熱や地熱などどんな熱源でも利用できる。

内燃機関と異なり爆発を伴わないため、低騒音・低振動・低公害のエンジンである。

2. スターリングエンジンの作動原理

図1は2ピストン型（ α 型）スターリングエンジンの作動原理を示したものである。

図1のように、スターリングエンジンは、膨張側クランク軸と圧縮側クランク軸に 90° の位相差が設けてあり、常に、圧縮側ピストンが膨張側ピストンを追う形になっている。そして、密閉された気体は、両シリンダを次の行程で移動し機関を回転させる。

(1) 加熱行程

膨張側ピストンは下降し、圧縮ピストンは上昇する。この間に内部の気体は圧縮側から膨張側へ移動し、バーナで加熱された高温の空間が増すことで、内部の圧力が上昇する。

(2) 膨張行程

膨張側ピストンは下降し、圧縮ピストンも下降する。この間に加熱行程で圧力の高まった気体がピストンを押し下げ、外部に仕事をする。

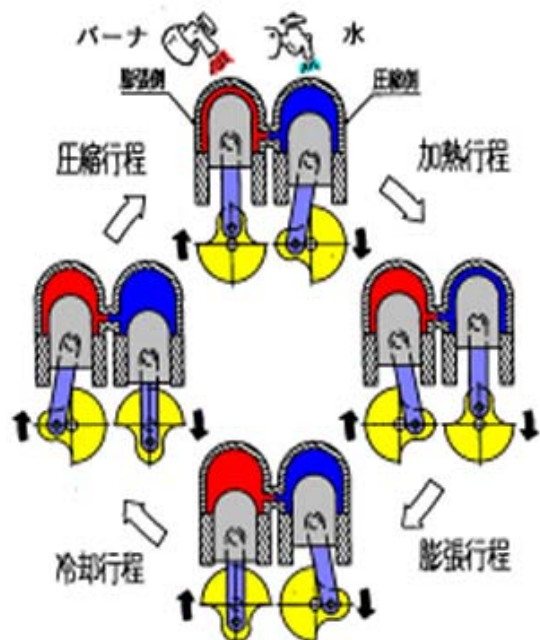


図1 スターリングエンジンの作動原理（ α 型）

(3) 冷却行程

膨張行程でバランスウエイトやフライホイールに蓄積された仕事（力）により、膨張側ピストンは上昇し、圧縮ピストンは下降する。この間に内部の気体は膨張側から圧縮側に移動し、水・空気で冷却さ

れた空間が増すことで、内部の圧力が低下する。
 (4)圧縮行程
 膨張側ピストンは上昇し、圧縮ピストンも上昇する。この間の冷却行程で圧力が低下した気体によっ

て、ピストンが引き寄せられる。
 このように、スターリングエンジンは加熱、膨張、冷却、圧縮を繰り返すことで回っている

年度	主な研究内容	スターリングテクノロジー大会での主な成績
9	・ T字型クランク機構の研究開発を行う。この機構の寸法割り出しのための計算プログラムをコンピュータで作成した。 ・ 冷却側のシリンダの周囲に水路を設け、強制水冷方式を採用。『安全第1号』 ・ 再生熱交換器を設け熱効率の向上を図った。『安全第1号』	第1回（7月31日～8月1日東京） 高校生の部スピード部門 『安全第1号』3位 『フジコ1号』5位、『レスポ-ル号』6位 【直線走路13m】
10	・ 文部省（現文部科学省）の助成を受けピストン・シリンダにチタン合金を使用した研究を行い高い評価を得た。『桃太郎』 ・ T字型クランク機構を改良、機械的損失を低減しスムーズな回転を得ることができた。『轟くエンジン倉工号』	第2回（11月14日～15日埼玉） 高校生の部スピード部門 『桃太郎』参加 『轟くエンジン倉工号』参加 【直線走路20m】
11	・ この回よりミニクラスが登場し、新しく『勝造君』を製作し加熱器にチタン合金を使用し軽量化を行った。 ・ ロータリーエンジンを参考にT字型クランク機構を根本的に改良し、出力軸を同心としたロータリー式T字型クランク機構を開発。滑らかで高回転を得ることができた。また、限界までの軽量化を行い成果を残すことができた。『神風』 ・ 走路が直線よりU型走路30mとなる。	第3回（11月13日～14日埼玉） 高校生の部ミニクラススピード賞 『勝造君』2位 【0型走路10m】
		高校生の部ノーマルクラススピード賞 『神風』3位 【U型走路30m】
12	・ パーナーの研究を重ね、オリジナルのパーナーを製作。 ・ 新しくγ型スターリングエンジンの開発を行い、『S A W A』に搭載した。 ・ 新しく4つのピルトン、ロータリー式T字型クランク機構を搭載した『小GO』を製作し、設計・バランス等で高い評価を得、奨励賞金賞に輝いた。 ・ この回より円形走路40mとなったためカーブで滑らかに走行させるため、前輪の操舵システムを開発し装備した。	第4回（11月13日～14日埼玉） 高校生の部ミニクラススピード部門 『ガンバ倉工』6位 【0型走路10m】
		『小GO』5位、『S A W A』15位 【円形走路40m】
		奨励賞 金賞 『小GO』1位
13	・ ピストンを改良し排気量を大きくし出力を上げた。『飛びちれ火花号』 ・ ミニクラスの大排気量、大出力機の製作を行った。『轟くエンジン号』 ・ この回よりパーナーの取り扱い競技規則が変更となった。しかし、大会までの改造が間に合わず涙をのんだ。 ・ 乗用のスターリングエンジンカーの基本設計を行い今後の課題とした。	第5回（11月10日東京） 高校生の部ミニクラススピード部門 『轟くエンジン号』参加 【0型走路10m】
		高校生の部ノーマルクラススピード部門 『飛びちれ火花号』参加 【円形走路50m】 公式記録発表資料がない。
14	・ ミニクラスにて極限までの軽量化を行った大排気量の機種を製作。大会の直前に不具合が生じ、シリンダ、ピストン等の大幅な設計変更を行った。『ジェットサイクロン』 ・ 前回の失敗を踏まえ、パーナーの改良を行なうと同時に、ピストン、シリンダ、車体の大きな改造を行った。『おかBIG』	第6回（11月16日埼玉） 高校生の部ミニクラススピード賞 『ジェットサイクロン』3位 【0型走路10m】
		高校生の部ノーマルクラススピード賞 『おかBIG』3位 【円形走路50m】

表1 6年間の研究内容と主な成績等

4. スターリングエンジンカーの設計の歩み

エンジンを設計する上で機械効率・熱効率を上げ、出力大きくするために以下の項目について検討を重ねて改良を加えた。

行程容量を多きくするとともに、死容積を少なくすることで圧縮比を増し、出力を上げる

機械的損失を少なくし、回転数を上げる

膨張側（高温側）と圧縮側（低温側）の温度差を大きくする。これは、熱効率を上げる方向とも一致する。

以上の事を解決するために、表1に6年間の研究内容と主な成績等をまとめた。

(1) T字型クランク機構の開発と改良

本校では機構を考える上で、平成9年より図2のT字型クランク機構（ロス機構）を採用している。

この機構は、図2で2つのクランク軸に約90°の位相差を設けた、単クランク機構とほぼ同じ動きをする。

図2にて両者の機構の比較をしてみる。単クランク機構はクランク軸の変心量が7mmでピストン（コンロッド）の行程が14mmであるのに比べ、T字型クランク機構は変心量が4.5mmで同じ14mmのストロークを得ることができる。

このことによって、T字型クランク機構は小型・軽量に製作できる。また、コンロッドの傾き（クランクの変心量によって生じる）による、ピストンにかかるサイドスラスト（軸に垂直にかかる力）を軽減することができ、機械的損失が少なく、高回転に対応した機構と言えるであろう。

次に、図2でT字型クランク機構とロータリー式T字型クランク機構を比較してみる。両者は全く同じ動きをする。しかし、写真1・写真2からもわか

るように、当初のT字型クランク機構は2つのバランスウイトで支えられており機械的に出力軸の中心がでにくい。そこで、平成11年よりロータリーエンジンを参考に図2・写真2のように発想を逆転させ出力軸を1本（同心）とすることができた。このことで滑らかで機械的損失を大幅に軽減した機構となった。



写真1 T字型クランク機構



写真2 ロータリー式T字型クランク機構

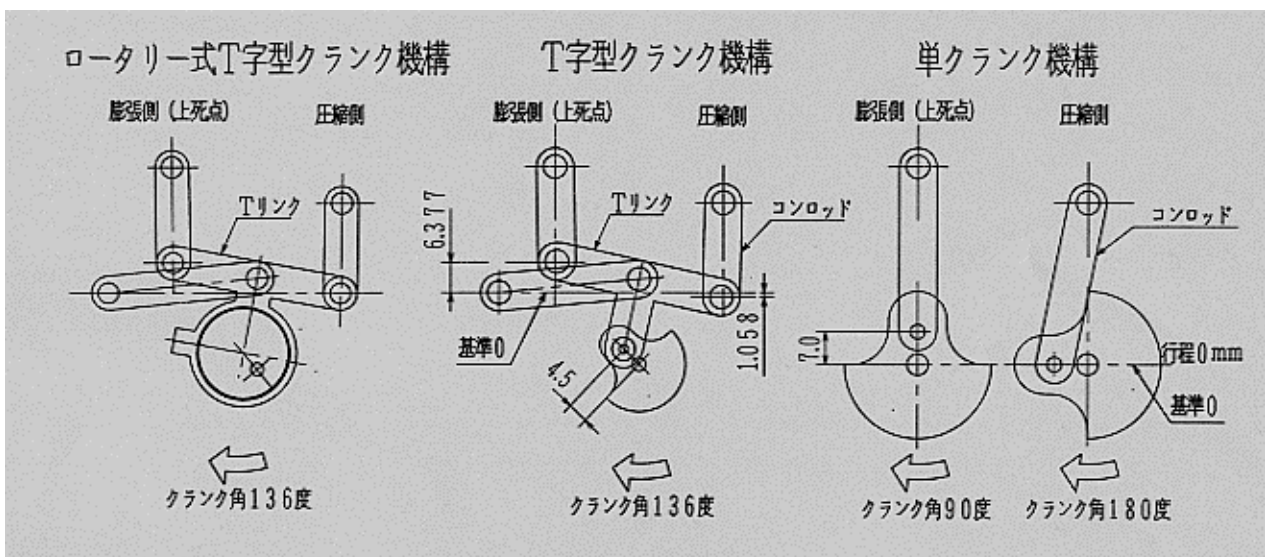


図2 T字型クランク機構（ロータリー式）と単クランク機構との比較

(2)再生熱交換器の採用

内部の気体が膨張側（高温側）から圧縮側（低温側）に移動する際、短時間の移動のため、両者に大きな温度の差を得ることは困難である。

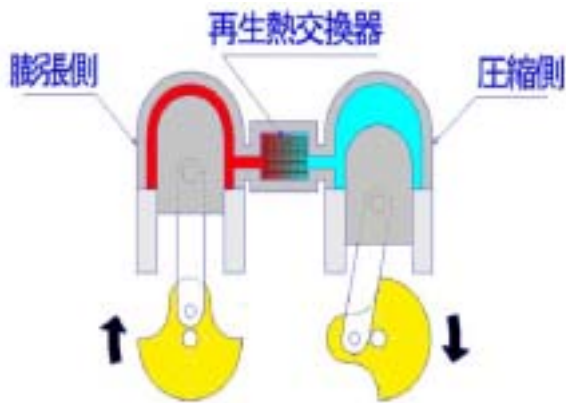


図3 再生熱交換器

そこで、図3のように両シリンダの通路に再生熱交換器を設置することで熱効率を上げ、ひいては機関の出力を上げることができる。

再生熱交換器は、細い金網や小さいボール等を多数詰めた容器であり、高温側の気体が低温側に通過する際、金網に熱をあずけ金網の温度が上昇する。反対に低温側の気体が高温側に通過する際、熱せられた金網から熱を奪い、温度が上昇した気体は高温側に移動する。



写真3「神風」再生熱交換器

平成11年の『神風』では膨張側と圧縮側の間に写真3のような箱を設け、その中にステンレスの金網をジャバラの状態にして詰め込んでいる。そして、気体が高温側から低温側に移動する際、この箱を経由して行く構造に設計してある。この方式は現在までのすべての機種に採用されている。

(3)材質の検討～チタン合金～

現在、スターリングエンジンのピストンとシリンダには気密を保ち熱に強い材質として、耐熱ガラス製の注射器をカットして使用している。しかし、温度上昇によってアルミ材料が熱膨張を起こしガラスが割れるなど、熱の作用によるガラスの破損に苦慮している。そこで軽い（比重4.5）、熱に強い、線膨張係数が小さい（SUS304の約1/2）などの理由でチタン合金のピストンとシリンダを製作した。（写真4・写真5）この試みは平成10年に文部省（現文部科学省）の助成を受け研究し『桃太郎』に搭載をした。



写真4 チタン合金ピストン



写真5 チタン合金シリンダ

研究はチタン合金の機械的性質、切削理論から始まった。しかし加工していくに従い、切削時における切刃の破損（チッピング）、ヤング係数が小さいため薄肉加工時の材料の変形など、大変加工しにくい材質であった。更に気密性を必要とするため研削が必要であったが機械設備が充実していなく、汎用旋盤、CNC旋盤などで熱膨張を加味し、1/1000mmの精度で測定を繰り返しながら切削を行った。

しかし、実験を繰り返していくうちに高温での焼付き・耐摩耗性の低下などのチタン合金の欠点が悪影響を及ぼしてしまい、今後、表面処理の必要性、

異種金属（非鉄金属）との組合せ等多くの課題をのこした。

(4) 操舵の工夫

第1回（平成9年）大会では直線走路 13mの距離でスピードを競うものであったが、回を重ねるに従い表1で示したように距離が長くなるとともにU型走路、O型走路と走路の形状も変わってきた。写真6は第4回大会での円形走路 40mである。



写真6 第4回大会円形走路 40 m

そこで、第4回大会よりカーブでの走行抵抗を軽減するため、前輪の操舵システムを開発した。（写真7）これは、ガイドローラーがカーブで壁に接触したとき、車体をカーブの中心に押す力が生じる。その際に前輪のステアリングが自動的に走行方向に向くようになっている。そして、直線走路になった場合はスプリングで強制的にステアリングを戻す構造としている。このことで走行抵抗を軽減しスムーズなコーナリングを行うことができる。また、5回大会よりさらに距離が長くなりO形走路 50m となっている。



写真7 前輪操舵システム

(5) バーナーの研究

出力を上げるため膨張側（高温側）と圧縮側（低温側）の温度差を大きくすることが重要である。そのために大容量のバーナーで、加熱器から車体に熱が伝わる前に、急速に加熱器を加熱する必要がある。また、走行時も同様でいかに加熱を続け、出力を上げるかが勝敗を分ける。そこで、どの参加団体も、大容量のバーナーを搭載することに苦慮していた。しかし、重量が重く走行抵抗が増すのは当然である。

本校では市販の軽量のバーナーを搭載していたが、走行距離が回を重ねるごとに長くなり熱容量に限界がきた。そこで、平成12年度にはバーナー製作班をつくり各社のバーナーを分解・スケッチ・図面化し本校独自のバーナーを造り上げた。（写真8）



写真8 自作バーナー

ところが、平成13年度（第5回大会）より競技規則が改訂され、「ノーマルクラスの加熱方法は、搭載した加熱源のみで行うものとし、他の方法による加熱は認めない。」とされ、この変更にとまなう改良が間に合わず涙をのんだ経験がある。

そこで本年度は、写真9のようにバーナーの重要部品は市販のものを使用し、配管等を独自で設計し「おかB I G」に搭載して大会に臨んだ。



写真9 本年度製作したバーナー

(6)その他

その他工夫しているところは部品組み立ての際、誰が組み立てても中心間距離・軸中心等がずれないように、部品に凹凸をつけるなどの配慮をして設計した。加工精度は測定工具にデジタルノギス（最小目盛り 1/100mm）を使用し、位置決めにはマシニングセンタ（最小目盛り 1/1000mm）を使用した。組み立ては、定盤を使用し行っている

また、設計段階で苦労したのは、軽量化することによって走行抵抗は軽減できるのだが、部品等の肉厚が薄くなるにしたがい、熱の熱伝達速度が増し、蓄積された熱によって車体自身の温度が上昇し、反対に熱効率が悪くなる。

特に、ほとんどの部品が熱伝達率が高いアルミ合金を使用しているので、熱を空気中に放出するための冷却ヒレを軽量化を考えながら設置した。

5. 指導重点目標ならびに製作過程計画について

(1)指導重点目標

指導にあたっては以下の項目を念頭におき指導した。

- ・基礎的、基本的な知識と技術を習得させる
- ・生徒の自主性、やる気、創造性を養い、実際的な技術者を育成する。
- ・安全に関して多方面から検討し徹底させる。

(2)製作課程計画

4月に本課題研究班生徒7人と以下のような年間計画を考えた。

スターリングエンジンについて

- ・作動原理について理解し、性能、効率を向上させるための機構を研究する。

部面の作成

- ・軽量化をするために、材料の強度・加工手順等を考え、部品図・組立図をCADで作成する。

部品の加工

- ・安全作業について徹底し、保護具等を整備する。
- ・材料（アルミ合金、ステンレス）に関する機械的性質、切削理論について研究する。
- ・測定機器、機械の取り扱いについて研究する。
- ・最適な作業手順を各自で研究し、100分の1の精度を追求し、部品を加工する。（デジタルノギス・ダイヤルゲージ使用）

組み立て・調整

- ・定盤、測定器具を使用し、スムーズに回転、駆動するように調整、組み立てを行う。
- ・洗浄用のシンナー、アセトン等の取り扱いを勉強する。

研究発表等

- ・第6回スターリングテクノラリーに参加し入賞を目指す。
- ・本校課題研究発表会（平成15年2月下旬電子機械科3・2年生参加）で発表する。
- ・図面の整理を行う。

自己評価ならびに今後の課題

- ・各自で自己評価をする。
- ・下学年に今後の課題を検討し申し送り事項を作成する。

6. 大会に参加して

今回の第6回スターリングテクノラリーでは、大会直前になり参加車輛にトラブルが生じ、部品の設計変更等あわただしいものであった。このことが尾を引き大会当日においても、その不具合を全て解消することができず、不完全燃焼の大会であった。しかし、生徒の熱心な努力により、どうにか入賞することができた。成績は以下のとおりである。

高校生の部ミクラスビード賞『ジェットサイクロン』3位

高校生の部ノーマルクラスビード賞『おかBIG』3位



写真10 本年度入賞スターリングエンジンカー

7. 今後の課題

本研究は3年生の課題研究2単位で行っている。そのため作品を造り上げるには授業時間内では不可能である。実際、今夏季休業中のほとんど毎日登校し、終日研究・制作を行っていた。また、3年生の課題研究のため、大会に向けて8ヶ月しか時間がなく、1～2カ年といった継続的な指導ができないことが大変残念である。

今後、昨年度設計段階でストップしている乗用スターリングカーをどのように展開していくか。資金面、時間面と考えあわせながら新しい取組に挑戦していきたい。