

# V形6気筒スターリングエンジンの改造 (第10報, 第11回スターリングテクノラリー)

遠山 壽

## 1. はじめに

自作模型スターリングエンジンは、小学校向けの“ものづくり”から大学の機械設計の授業教育内容まで普及している。そのような教育は、地球資源を考える上でも有益である。最近、原油価格が高騰している中、太陽熱やバイオマス資源などを使用し、石油依存度を少なくすることが求められている。バイオマス資源の有効活用の一つとしてスターリングエンジンが考えられる。

1997年より始められたスターリングテクノラリーは、今では競技種目が6クラス(後述)になり、年々、高校や大学生など参加者が増して来た。我がチームは、1997年の第1回大会よりノーマルと人間乗車クラスの2種目に参加してきた。2004年には、V形6気筒のエンジンを搭載したスターリングエンジンカーを試作し改造を加えてきた<sup>2~4)</sup>。

本稿では、2007年の第11回大会に参加したエンジンの概要と“第11回スターリングテクノラリー”の競技結果について報告するとともに本学以外の参加車両の概要について述べる。

## 2. 改造の概要

今回改造したβ形エンジン<sup>1)</sup>(1つのシリンダにディスプレイサとパワーピストンがある形式)のV形6気筒スターリングエンジンカーの諸言を表1に、その外観を図1に示す。

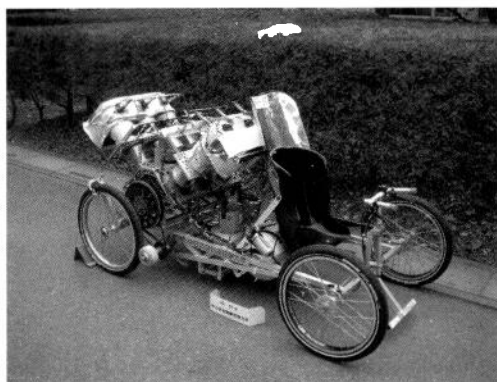


図1 ヘリウム搭載V形6気筒スターリングエンジンカー

表1 試作車諸言

エンジンの形式	β形 V形6気筒
ディスプレイサ	ボア×ストローク φ80×50
パワーピストン	ボア×ストローク φ82×40
位相差	75°
加熱源	市販ガスバーナ, プロパンガス
無負荷・最高回転数	600rpm
トレッド: 前	840mm
: 後	870mm
ホイールベース	1295mm
全長	1900mm
全高	980mm
車両重量	130kg
フレーム材質	アルミ合金

今大会のレギュレーションの変更点は、10分の走行時間が60分になった事である。加熱・冷却を交互に行うスターリングエンジンは、熱交換ができなくなるとエンジンは止まってしまう。加熱用のガス供給量が十分あることと、加熱・冷却による温度差を維持することが、どれだけの距離を走れるかのキーポイントとなる。

### 2. 1 加熱用のガス供給

市販のガスバーナは、1本のまま使用すれば60分使用できるが、内容量が減少してくるとその分加熱が弱くなりエンジンの出力が低下する。そこで今回は、図1に示すように、市販のガストーチとプロパンガスボンベ（5 kg）2本を使用し、各シリンダに3方向から加熱できるようにバーナを配管し、出力が60分間落ちないように改造した。

### 2. 2 温度差の維持

加熱時間が長くなると加熱部と冷却部の温度差が小さくなる。冷却水の量を増やせば温度差を長く保てるが、エンジンが重くなる。そこで今大会では、長時間の走行を考慮し、ウォーター・ジャケットの冷却水の量を幾らか多くする事にした。

### 2. 3 ヘリウムの使用

#### (1) ヘリウムの特徴

実用化されているスターリングエンジンは、出力を上げるため作動ガスにヘリウムが使われている。1916年に考えられた古いエンジンであるが、最近、実用的なバイオ発電機が製作され発売されているエンジンでは殆どが作動ガスにヘリウム（以下 He と称する）を用いている。人間乗車クラスで出力を上げるためには、He を使うのが有効である。その特徴を以下に述べる。

① 加熱，冷却を交互に繰り返す外燃機関・スターリングエンジンは，熱伝導率，粘性が重要で，高いほど熱の受け渡しがスムーズに行われ，粘性が低いほどエンジンの中をスムーズに流れる。図2に示すように，その点で水素（以下 H<sub>2</sub> と称する）が最適である。しかし，H<sub>2</sub> は金属を腐食させ，危険性が高いガスである。

② 気体の密度 (kg/m<sup>3</sup>) は，温度 (0℃)，圧力 (1 atm)，容積 (1 m<sup>3</sup>) の非作動状態時に，空気1.29，He 0.18，H<sub>2</sub> 0.09である。作動状態では，圧力，温度が高くなり，He は空気（以下 Air と称する）より多くシリンダに入れることができる。

③ 同じ容積，同じ圧力変化では，表2で示すように mol 数が同じなら気体定数と質量の積 (mR) は8.314と同じだが，等容比熱 (Cv) が小さく，比熱比 (Cp/Cv) が大きい He のほうがエンジンの効率を上げるには有利である。

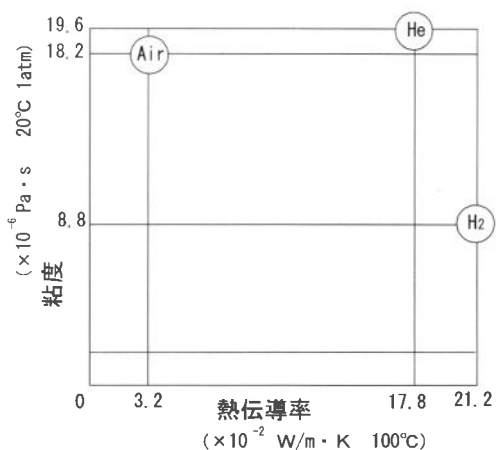


図2 熱伝導率と粘度の関係<sup>5)</sup>

He : 1.66, Air : 1.40, H<sub>2</sub> : 1.40である<sup>5)</sup>。

上述のように、作動ガスにHeを用いるのが良いが、空気と比べると、加工精度によってピストンクリアランスの影響は大きく漏れ易くなる。漏れ防止に摺動面を潤滑オイルで充たせば、粘性抵抗が大きくなり作動が困難になる。

## (2) ヘリウムの注入

ヘリウムは、低温側のシリンダ・フランジに逆弁を付け注入する。エンジン作動中に連続して注入すると、冷却され過ぎて高温側の温度が下がる。注入する間隔が異なり、エンジン全体のバランスが悪くなり止まってしまう恐れもある。また、ガスの分子は小さいため、摺動面から抜け易くなる。したがって、注入は手動で自由にON, OFFできるスイッチを取り付けた。

## 2.4 ピストンリング

内燃機関エンジンに比べ圧縮比の小さいスターリングエンジンでは、ピストンとシリンダの摩擦は、エンジンの性能に大きな影響を及ぼす。今回は、図3で示すように、抵抗の小さい特殊な幅1mm, 厚さ3mmのテフロン・カーボン製の市販ピストンリングを使用した。

## 2.5 ピストンリング溝

図4に示すように、リング溝を追加加工してピストンリング(図3)を取り付け、加工前の溝はそのままラピンス効果(幾つかの溝によって作動ガスのシール性を高めること)として利用した。

表2 比熱, 比熱比

	He	Air	H <sub>2</sub>
m (g/mol)	4.003	28.95	2.016
R (J/gK)	2.077	0.287	4.125
mR (J/molK)	8.314		
mC <sub>p</sub> (J/molK)	20.97	29.1	28.6
mC <sub>v</sub> (J/molK)	12.65	20.76	20.3



図3 ピストンリング

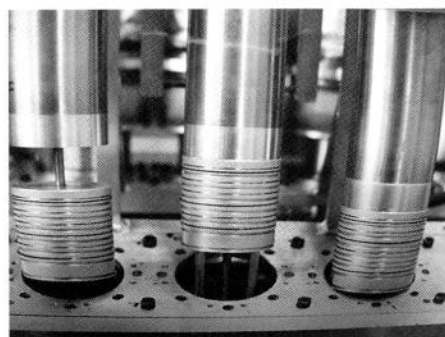


図4 ピストンリング溝

## 3. 大会の概要と結果

今回の大会は、2007年11月17日、埼玉県南埼玉郡に所在する日本工業大学で行われた。競技種目は、ノーマル, 宙返り耐久, 人間乗車(以後Lクラス), 無線操縦, 3V クーラ, 100V クーラ(SC100)の6クラスで行われた。

Lクラスの規定は、ドライバーが安全に走行できるサイズで2, 3, 4輪可能である。長さ14m×34mのコースを60分間走行し、走行距離を競う。Lクラス以外の規定は前報に掲載した<sup>4)</sup>。

表3 ノーマルサイズクラス出場台数 57

順位	参加団体名	チーム名	公式記録
1	湘南 EcoDrive	MASHU	18.56秒
2	大森学園高等学校	大森学園高等学校 B	24.36
3	茨城県立取手第一高等学校	ウェノムバースト2号機	29.97

表4 MDクラス出場台数 92

1	都立中央城北・職業能力開発センター板橋	Fujiyama	12.5周
2	都立蔵前工業高等学校	蔵高1号	11
3	都立杉並工業高等学校	バーガー	10.5

表5 RCクラス出場台数 8

1	1 湘南 EcoDrive	APSARA	1分5秒5
2	都立杉並工業高等学校	SK1411	1分7秒0
3	湘南工科大学 ST 開発研究会	永田 RC	1分8秒9

表6 人間乗車クラス出場台数 14

1	滋賀職業能力開発短期大学校	SPC - S	6499m
2	中日本自動車短期大学	NAC 岐阜1 (V 6 ベータ)	4699
3	宇都宮大ものづくり同好会	宇都宮大教育学部	663

表7 クーラ3V 出場台数7

			(降下温度)
1	都立杉並工業高等学校	SK - Cool 2	30.6℃
2	米子工業高等専門学校	MOSEY-C07-CHILLY	20.4
3	北九州高等専門学校	物作大好フリー型β	16.8

表8 クーラ100V 出場台数 57

			(5分間降下温度)
1	明星大学	4年生	10.0℃
2	明星大学	A. KOMACHI	9.0
3	沼津工業高等学校	沼津工業高等学校 SC100	5.0

アイデア賞・・・七輪車製作委員会・七輪車 日本ユニシス/エクセリューション(株)・a-i-e Car  
 熱源賞・・・都立杉並工業高等学校・SK-19, 千葉職業能力開発短期大学校・ポリテクカレッジ  
 成田1, 日本工業大学付属東京工業高等学校・クラスA チーム

今大会6クラスの競技結果は表3～8に示したが、チーム名、参加台数、そして上位3位までの記録である。

Lクラスの参加車両は13台である。我がチームのV6ベータは、スタート20分ほどは快調なスピードで走行したが、途中の27分でバーナの一部分の火が消失するトラブルがあり、出力不足で車両が停止してしまっ。記録は4699mで2位となった。

参加者の多くが注目した車両として、アイデア賞を獲得した車両を図5に示した。加熱源として炭火(火知燐)を使用している。図6に示すように中心部分の炭火によって8シリンダを加熱する。火知燐をもじって七厘車と名付けられ、長い煙突で空気を吸引し、加熱を容易にしたユニークなエンジンである。残念ながら走行中に火知燐の位置がずれて加熱不足となり、45mで止まってしまった。

図7は、今大会では唯一60分間走行し、走行距離6499mで1位となった車両である。加熱はプロパンガスによって横と上部計4箇所から加熱している。特に、加熱器上部には、図8で示すようなピンフィンヒータ(Pin-fin-heater)が加工され、溶接されている。加熱部の表面積を大きくして熱を取り入れ、保持することで効率を上げている。また、シリンダのボアが130.5mmと大きいのでクーラ側の冷却が十分行えないため、ラジエータを取り付けて冷却水の温度を管理している。速度は約9 km/hで我がチームより遅いが、60分間止まることなく完走したのは驚いた。

#### 4. あ と が き

今大会に出場したV6ベータの改造の要点をまとめると、前述のようにプロパンガスの搭載とヘリウムの注入である。回転数は無負付加運転でヘリウム注入前350rpm、注入後では600rpmと、増加は顕著で



図5 アイデア賞・七輪車

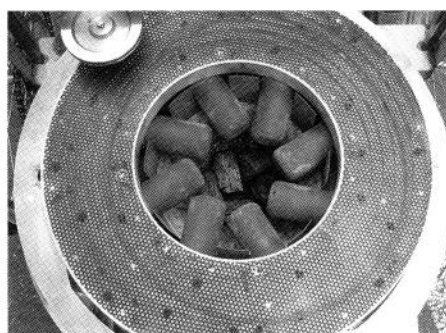


図6 円形に配置した8シリンダ



図7  $\beta$ 形2気筒エンジンカー

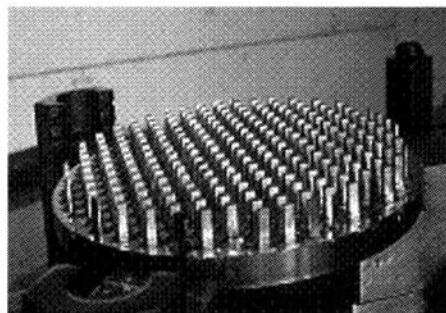


図8  $\beta$ 形2気筒エンジンカー

ある。しかし、走行がレギュレーションの60分間で走り終る前にV形エンジン片側のバーナ6気筒の火が消失してしまった。残念であった。3方向から加熱器を熱しているのが、2方向が消失したため、上方から1方向の火炎だけになり加熱不足になったため、60分走行できなかった。原因は走行中に座席カバー後部が負圧になり、バーナ部分に必要な空気が十分供給できなくて消失し、それによって出力が減少したためと考えられた。

早速、大会終了後に改良し学内のコースで再走行を試みた結果、大会中より快調で平均14km/hで走行し、火炎の状態は消失無く正常だったが、約30分間でエンジン出力が減少し、車両は停止してしまった。原因は当初考えた火炎の消失だけでなく、高温側と低温側の適度な温度差を保持できなくなり、30分間で想像した以上にエンジンの状態が変化していたと考えられる。

そこで、次の大会に向けて(1)ヘリウム注入によって回転数が上がり熱の移動も早く、シリンダ内の熱交換が追いつかず、ウォーター・ジャケットによる冷却が適切でなかったと考えられるので、今回はラジエータを取り付けて冷却水の温度管理をすること、(2)加熱部はピンフィンヒータを加熱器上部に取付け、内部温度を上げ効率を上げることを検討課題にしたいと考えている。

おわりに、本稿作成に際しご指導頂いた高行男教授に謝意を表します。また、走行試験や今大会にドライバーとして協力頂いた2007年度生の佐々木 亨、王 娜さんに感謝致します。

## 5. 参 考 文 献

- 1) 遠山 壽：模型スターリングエンジンカーの試作（第1報，第1回スターリングテクノラリー），中日本自動車短期大学論叢，第28号79-84（1998）
- 2) 遠山 壽： $\beta$ 形エンジンのスターリングエンジンカーの試作（第6報，第7回スターリングテクノラリー），中日本自動車短期大学論叢，第34号47-52（2004）
- 3) 遠山 壽：V形スターリングエンジンカーの試作（第7報，第8回スターリングテクノラリー），中日本自動車短期大学論叢，第35号23-28（2005）
- 4) 遠山 壽：第9回スターリングテクノラリー中日本自動車短期大学論叢，第36号，9-15（2006）
- 5) 参考：[www5.ocn.ne.jp/~crachica/kikai/he/he.html](http://www5.ocn.ne.jp/~crachica/kikai/he/he.html)