

お湯を熱源とする低温度差スターリングエンジンを 搭載した模型車「HW- α Twins」の開発

竹内 誠一*

Development of Model Car "HW- α Twins" Operated by the Hot Water-Powered Low Temperature Difference Type Stirling Engine

Seiichi TAKEUCHI*

Synopsis: The model car "HW- α Twins" with two-cylinder engines operated by the hot water-powered alpha type Stirling engine was developed. Each of the two-cylinder engines of HW- α Twins had the same specifications as the engine of HW-UnitTwo. The weight of the car increased significantly compared to HW-UnitTwo, but since the engine power was doubled, sufficient power was obtained to drive. In addition, by using a paper cup with light weight and excellent heat resistance for the hot water tank, the sustainability was also improved. I participated in the HW class in the 25th Stirling Techno-Rally as well as a driving test of HW- α Twins. HW- α Twins finished the race without stopping for three minutes and was able to drive 3.5 blocks. This result was 3rd place and was commended.

(Received Aug. 9.2022)

Key words: hot water-powered alpha type Stirling engine, model car, Stirling techno-rally

1. 緒 言

スターリングエンジンは、シリンダー内部に封入した気体を外部から加熱および冷却することによって生じる気体の膨張・圧縮力を動力に変換する外燃機関である¹⁾。理論熱効率が低い点や、太陽熱や地熱、工場排熱といった内燃機関では利用できない熱源が使用できることから、環境調和型動力源として注目されている²⁻³⁾。

しかし、上述した自然エネルギーや排熱はエンジンを作動させるエネルギーとしては小さいものであ

るため、これらの熱源の利用を可能にするためには、少ないエネルギーを有効利用できるエンジンの開発が必要である。そこで本研究室では、少ないエネルギーの代表例としてお湯に着目し、これまでお湯で走行できる模型車の設計・開発を行って、エンジンの動力利用を図ってきた。

第一号機として開発したのが、Fig.1に示す α 型のエンジン型式を有する模型車「HW-UnitOne」⁴⁾である。この「HW-UnitOne」はお湯を熱源として、直線で8mを110秒間で走行させることに成功した。一方、この車両は完全な横置き型であったので、重力によるサイドスラストの影響が非常に大きい点と、

*産業技術短期大学 教授 博士 (工学) 機械工学科

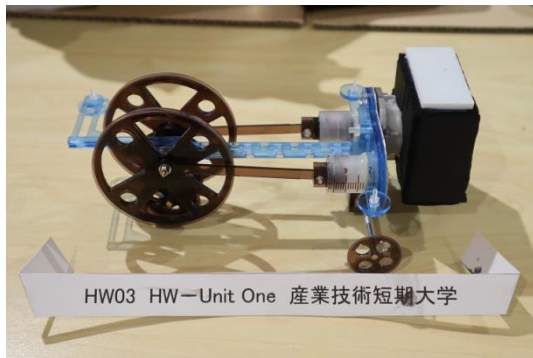


Fig. 1 Photograph of low temperature difference type Stirling engine car 「HW-UnitOne」.

重心がかなり後方寄りであったので、時として前輪が浮いて走行できなくなるという欠点も抱えていた。

これを受けて開発したのが、第二号機「HW-Unit Two」⁵⁾である。その外観を Fig.2 に示すが、大きな違いはエンジンを横置き型から完全な縦置き型に変えた点にある。これにより車高こそ高くなったが、重力による影響が無くなり、加えて重心の偏りも大幅に軽減されたので、安定的な走行が可能となった。さらに、前輪部の改良やガイドローラーの取り付け位置等の工夫などにより、カーブの走行が可能となり、大幅な性能向上が図られた。

一方、走行性能は格段に上昇したとはいえ、それでもエンジンの出力が車体を動かすには些かパワー不足であった。また、車両本体を軽量化するためにお湯タンクの容量を相当に小さくしたことから搭載できるお湯の量が少なく、持続性に欠けているという課題もあった。

出力向上のため、ボアアップを図ることを検討したが、エンジンバランスが崩れて上手く作動しなくなる可能性があることを勘案すると、それよりは多気筒化の方が有効であろうと推察された。そこでエンジンを多気筒化した第三号機「HW- α Twins」の設計・開発を行った。そのうえで走行試験を兼ねて、第 25 回スターリングテクナラリー HW クラスに出場した。本報では、製作した「HW- α Twins」の仕様や走行性能について述べると共に、スターリングテクナラリーの結果などについて報告する。



Fig. 2 Photograph of 「HW-UnitTwo」 which is an improvement machine for HW-UnitOne.

2. HW- α Twins について

Fig.3 に「HW- α Twins」の外観を示す。「HW- α Twins」は「HW-UnitTwo」に搭載した α 型低温温度差エンジンとほぼ同じ仕様のエンジンを 2 つ搭載した 2 気筒（ピストンは計 4 本）スターリングエンジンカーであるのが特徴である。2 つのエンジンを V 字状に配置しており、中央にある 1 つのフライホイールを単クラック機構で回転させる構造をしている。Table 1 にエンジン各部の寸法と仕様を示す。前方から向かって第 1 エンジン、第 2 エンジンである。第 1 エンジンの仕様は「HW-UnitTwo」のエンジンと全く同じであり、第 2 エンジンはピストン間隔がわずかに第 1 エンジンよりも広がっているという違いがある。連結孔死容積が増す分、ごくわずかではあるが第 2 エンジンの方の圧縮比が低い。

以下にエンジンと車両の詳細について説明する。エンジンと車両本体は基本軽くて、かつ、加工しやすいアクリルで製作している。まず、エンジンの架台について説明する。架台は、「HW-UnitTwo」と同様、厚さ 2 mm のアクリル製プレートを 2 枚、0.3 mm のアルミ板 1 枚を貼りあわせて製作した。1 枚目のアクリルプレートには加熱側シリンダーならびに冷却側シリンダーを 1 つずつ取り付けた。中央の 2 枚目のプレートには、第 1 エンジンが 40.5 mm×5 mm×2 mm、第 2 エンジンが 50.5 mm×5 mm×2 mm の連結孔を設けており、貼りあわせの際に架台の内部で膨張空間と圧縮空間とが繋がるようになってい

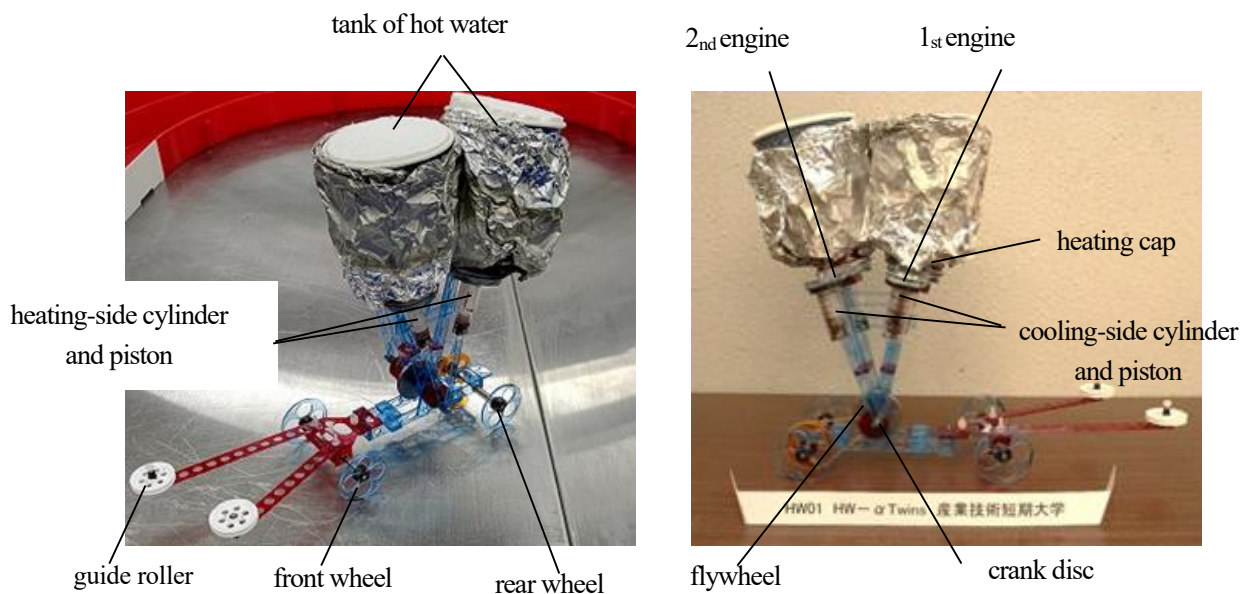


Fig. 3 Photograph of 「HW- α Twins」 .

Table 1 Specification of 「HW- α Twins」 .

		1 st engine	2 nd engine
Heating cap	Inside diameter	24 mm	24 mm
	Length	36 mm	36 mm
Heating side piston	Bore×Stroke	15 mm×15 mm	15 mm×15 mm
Displacer (Foamed styrol)	Diameter	22 mm	22 mm
	Length	20 mm	20 mm
Coolong side piston	Bore×Stroke	15 mm×15 mm	15 mm×15 mm
Dead volume		7093 mm ³	7193 mm ³
Phase difference		150°	150°
Compression ratio		1.150	1.151
Size	Full length	287 mm	
	Car width	80 mm	
	Vehicle height	185 mm	
Weight	Without hot water	232.0 gf	
	With hot water	328.0 gf	

る。なお、ヒートキャップ側となる 3 枚目をアルミ板としているのは放熱量の増加を見込んでのことである。

この架台を第 1 エンジン・第 2 エンジン共にそれぞれ中央に配置した 2 枚の亚克力製プレートでできた支柱に取り付けた。亚克力製プレートの厚さ

は 2 mm であり、プレートの間隔は第 1 エンジンが 15 mm, 第 2 エンジンが 23 mm である。これを Fig.4 のように、30°の角度で V 字状になるように接着固定した。なお、プレートの間は亚克力板で補強して強度を持たせている。

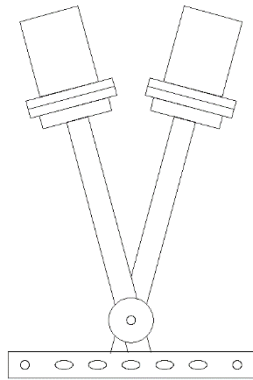


Fig. 4 Schematic view of two center props.

次に Fig.4 にヒートキャップの概略図を示す。ヒートキャップは、厚さ 3 mm のアクリル板を外径 27 mm、内径 24 mm のドーナツ状に切断したものを 12 枚積層し、それに蓋とフランジを貼り合せて製作した。蓋は厚さ 2 mm のアクリル板を上記のドーナツ状アクリル板と同形に切断したうえで溝を掘り、その溝に厚さ 0.3 mm の銅板をはめ込んで製作しており、お湯の熱がなるべくヒートキャップ内に伝わるように工夫してある。そのヒートキャップにお湯タンクを取り付けた。「HW-UnitTwo」ではお湯タンクもアクリル板を積層して製作したが、容量が小さいために搭載できるお湯の量が少なく、持続性に欠けるという問題があった。そこで、お湯タンクには軽量でかつ耐熱性に優れる紙コップを使用した。紙コップの底部に穴を開け、ヒートキャップの先端が 10 mm 程度出る高さで接着固定した。エンジン作動時はなるべくお湯の温度が下がらないよう、ヒートキャップ全体をアルミホイールで覆うという処置を施すようにしている。なお、エンジン作動時に 1 つのタンク

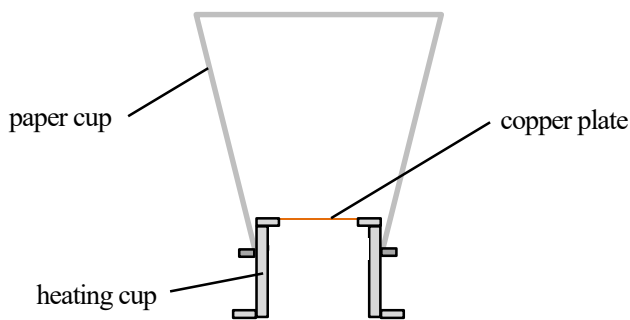


Fig. 5 Schematic view of heating cap.

内に供給するお湯の量は 48.0 gf であり、タンク 2 つ分で 96.0 gf である。13.0 gf を入れて作動させていた「HW-UnitTwo」に比べて、約 7.4 倍の量である。

次に、シリンダーならびにピストンは、加熱側、冷却側共に 10 mL ガラス製注射器を所定の長さに切断したものを用いた。それぞれの長さは、加熱側シリンダーが 25 mm、加熱側ピストンが 55 mm、冷却側シリンダーが 30 mm、冷却側ピストンが 15 mm である。双方ともにボアは 15 mm であり、ピストンのストロークは 15 mm としているので、掃気容積は 2651 mm³ である。これは第 1 エンジンも第 2 エンジンも同様である。なお、上述した通り、ヒートキャップの内径は 24 mm あり、ピストン径の 1.6 倍の大きさがある。そのため、加熱側ピストンをそのまま使用したのではクリアランスが大き過ぎてエンジンは動かない。そこで、外径 22 mm、内径 15 mm のドーナツ状に成形した厚み 5 mm の発砲スチロール 4 枚をピストンの先端に取り付けてピストン径を拡大させた。ヘッドのクリアランスは 1.5 mm である。

ピストンは、ナックルジョイント、コンロッドを介して 1 つのクランクディスクに直結させている。加熱側ピストンと冷却側ピストンの位相差はクランクディスクで設定した。α 型低温度差エンジンでは、両ピストンの位相差を通常の 90° より大きくすることで圧縮比を下げる必要がある。本エンジンでは位相差は 150° に設定した。これにより、エンジンの圧縮比は表 1 に示した値となる。フレームの中央に配置したフライホールは直径 35 mm、厚さ 3 mm のステンレス製円盤であり、軸受けにはミニチュアベアリングを用いて回転時の抵抗を軽減させた。

エンジンの動力はプーリーを介してゴムで後輪に伝えるようにした。プーリー比については様々に変化させたが、スターリングテクノロジー HW クラスに出場した際は 1 : 6.7 (プーリー径 5.0 mm : 33.5 mm) であった。

お湯を熱源とする低温度差スターリングエンジンカーは、出力が非常に小さいためにほんのわずかな抵抗があるだけでも止まるが、特にカーブを曲がる際に無理矢理タイヤの角度を変えたりすると大きな抵抗が生じて停止することが分かっている。

「HW-UnitTwo」では、前輪の向きを自由に変えてコーナリングができるように改良したうえで、ガイ

ドローラーの取り付け位置を工夫して壁に当たった際の衝撃を弱めることでカーブでも止まらずに走行することが可能となった。「HW- α Twins」でも同様に、Fig.6 に示すようにガイドローラーを長さ 100 mm のアクリル製プレートの先端に取り付け、なるべく前で壁に当てるように工夫しており、カーブでも止まらずに走行することが可能となっている。

スターリングテクノラリー HW クラスでは、市販のミニ四駆用走路を走るため、車幅は 113 mm 以下である必要がある。「HW- α Twins」のサイズは表 1 に示す通りであり、車両の全重量は 232.0 gf (お湯を含めると 328.0 gf) である。

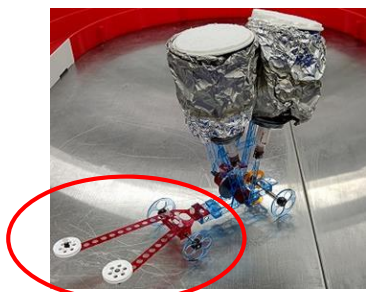


Fig. 6 Attachment of guide roller.

3. スターリングテクノラリーについて

次に、「HW- α Twins」の走行試験を兼ねて、第 25 回スターリングテクノラリー⁶⁾に出場したので、その結果について述べる。テクノラリーは 2021 年 11 月 13 日 (土) に東京都にある都立足立工業高等学校で開催された。

出場した競技クラスは HW クラスである。沸騰させた水道水を熱源として、Fig.7 に示す市販のミニ四駆用走路を周回走行し、車両の先頭がスタートラインを通過してから 3 分間以内に走行した距離 (周回数+ブロック数) の長さを競うクラスである。

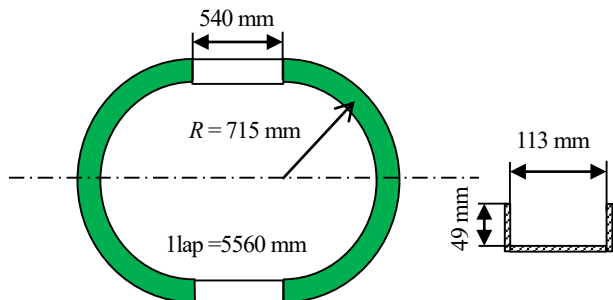


Fig. 7 The course of HW class in Stirling

Techno-Rally.

Fig.8 はレース時の様子を示したものであり、Table 2 は上位 5 チームの公式記録である。

「HW- α Twins」

は 3 分間一度も停車することなく完走を果たし、3.5 ブロックを走行した。上位 2 チームの成績と比べるとかなりの開きがあったものの、見事 3 位入賞して表彰を受けた。

上位 2 チームとは走行スピードに大きな違いがあり、上位 2 チームはプーリー等で減速せず、フライホイールを直接タイヤにして走行させているのに対して、「HW- α Twins」はプーリーを使用して減速させて走行させているところに違いがあった。このため、今後はいかに軽量化を図るかが焦点になると考えられる。

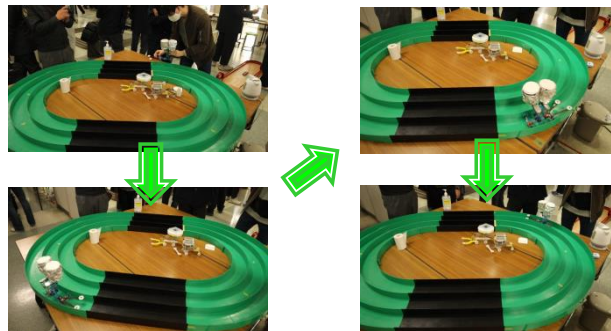


Fig. 8 Photograph of the race state.

Table 2 Official results of HW class in 25th Stirling Techno-Rally.

Ranking	Result	Team name
1	22	ボアザウルス
2	16.2	FK-21HW
3	3.5	HW- α Twins
4	1.9	ATH-HW01
5	0.8	MG レックス 17 号

4. プーリー比について

第 2 章でも述べたように、テクノラリーではプーリー比を 1 : 6.7 (プーリー径 5.0 mm : 33.5 mm) にして出場した訳であるが、最適なプーリー比を調査する時間的余裕がなかったため、停止せずに完走できる条件としてこの設定を採用した。そのため、このプーリー比が最適かどうかは不明であり、

「HW- α Twins」の最適な走行性能を引き出しているとは言い難い状況にある。そこで、プーリー比を様々に変更して、最適な条件を調査した。その結果を Fig.9 に示す。なお、実験実習棟 燃焼工学実験室内に同一のコースを用意してスターリングテクノロジーHW クラスのレース規定に準拠して実施した。

その結果、安全策として採用したプーリー比 1 : 6.7 であるが、それよりもプーリー比を小さくしても走行可能であることが分かった。そこでプーリー比を小さくしていったところ、走行スピードも上昇し、1 : 4.5 (プーリー径 7.5 mm : 33.5 mm) の際に最大走行距離である 5.4 ブロック走行した。テクノロジーの結果から 2 周近く走行距離を伸ばすことができたといえる。1 : 4.2 (プーリー径 8.0 mm : 33.5 mm) でもほとんど走行距離は変わらなかったが、それよりもさらに小さくしていくと、トルク不足のせいか逆にスピードも遅くなり、また途中で停車してしまうようになった。このことから、「HW- α Twins」の適切なプーリー比は 1:4.2 ~ 4.5 であるといえる。

前述した通り、「HW- α Twins」の走行性能を向上させるためには大幅な軽量化が必要である。軽量化が図れば、プーリー比をさらに小さくしても走行可能になり、走行速度の上昇から走行距離の延長が可能になると思われる。

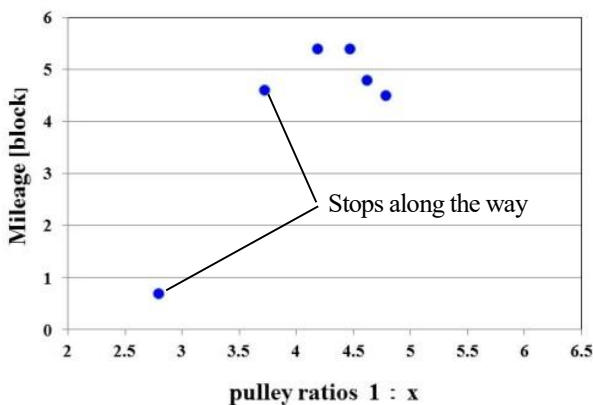


Fig. 9 Mileage with different pulley ratios.

5. 結 言

「HW-UnitTwo」における問題点をクリアすべく、

エンジンを多気筒化した改良機「HW- α Twins」の設計・開発を行った。そのうえで走行試験を兼ねて、第 25 回スターリングテクノロジー HW クラスに出場した。その結果、以下の結言を得た。

1. 「HW- α Twins」は「HW-UnitTwo」に比べて車両本体の重量が大幅に増加したが、2 気筒化によって出力が倍になったために十分走行できる出力が得られた。また、お湯タンクに軽量でかつ耐熱性に優れる紙コップを用いることにより、搭載できるお湯の量が増えたことで持続性も向上した。
2. 第 25 回スターリングテクノロジー HW クラスに出場した結果、3 分間停車することなく完走を果たし、3.5 ブロック走行できた。その結果、見事 3 位入賞を果たし、表彰された。
3. プーリー比を様々に変化させて最適なプーリー比を調査したところ、1 : 4.5 (プーリー径 7.5 mm : 33.5 mm) の際に最大走行距離として 5.4 ブロック走行し、テクノロジーの結果から 2 周近く走行距離を伸ばすことができた。

謝 辞

2021 年度卒業研修において、「HW- α Twins」の設計・製作に取り組んでくれた竹内研究室グループの学生諸君に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 山下巖, 香川澄, 百瀬豊, 浜口和洋, 平田宏一: スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, 1999.
- 2) 生方友和, 齊藤剛, 濱口和洋: 第 21 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, **63** (2018) 7- 12.
- 3) 関谷弘志, 君島悠斗, 松原光佑, 中原航, 宮田光: 第 22 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, **319**(2019)14-20.
- 4) 竹内誠一: 産業技術短期大学誌, **54**(2021)89-94.
- 5) 竹内誠一: 産業技術短期大学誌, **55**(2022)37-42.
- 6) スターリングテクノロジー公式サイト, <<http://www.stirling.jp.org/>>, (参照 2022-7-30).