

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-UnitTwo」の開発

竹内 誠一*

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

Seiichi TAKEUCHI*

Synopsis: The model car "HW-UnitTwo" which improved "HW-UnitOne" operated by the hot water-powered alpha type Stirling engine was developed. A big improvement is the point that the engine was changed to a vertical type from a horizontal type. The vehicle height became high, but influence of the side thrust by the gravity disappeared entirely. Moreover, partiality of the center of gravity has disappeared. Therefore, performance of the engine could be improved and a stable driving became possible. In addition, the set up method of a front guide roller was devised. HW-UnitTwo could drive a turn by this improvement. I carried out the race which supposed HW class in Stirling techno-rally. As a result, HW-UnitTwo succeeded to drive one round and five blocks in 88 seconds without stopping at a turn.

(Received Sep. 10.2021)

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・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⁾。このエンジンは理論熱効率が低い点や、太陽熱や地熱といった内燃機関では利用できない熱源の使用が可能であり、エネルギーの有効利用を図ることができる可能性がある点などが注目されている²⁻³⁾。

しかし、実際に太陽熱や地熱といった自然エネルギーや廃熱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。そこで前報⁴⁾では、自然エネルギーを利用できるエンジンの開発を目的に、お湯で作動する α 型低温度差スターリングエンジンの設計・開発を行い、そのエンジンを動力源として走行できる模型車「HW-UnitOne」の開発を行った。Fig.1はHW-UnitOneの外観である。実際にお湯で作動させたところ、エンジンは自立回転を行い、無負荷状態でフライホイールの最高回転数 246 rpm が得られ、走行試験では直線で 8 m を 110 秒間で走行させることに成功した。一方、走行試験を兼ねて出場した第 23 回スターリングテクノラリー HW クラスでは 4 位入賞を果たしたのだが、レースとしては最初のカーブに差し掛かるまでの直線わずか 0.2 ブロックを

*産業技術短期大学 教授 博士 (工学) 機械工学科

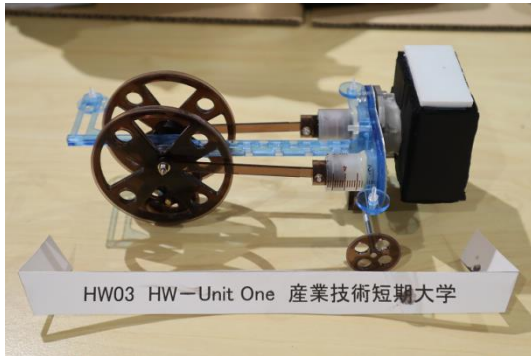


Fig. 1 Photograph of low temperature difference type Stirling engine car 「HW-UnitOne」.

走行したのみで、最初のカーブにおいてコースの側壁に接触した瞬間に停止するといった内容であり、とても満足のいくような結果ではなかった。

Fig.1 に示した HW-UnitOne は横置き型であるため、重力によるサイドスラストの影響が大きく、これがロスに繋がっている可能性が高い。また、構造上重心がかなり後方寄りであり、特にタンクにお湯を入れた際にそれがより顕著に現れており、レース中には前輪が浮いてしまって走行できなくなるというトラブルにも見舞われた。それに加え、ガイドローラーが車体近傍に取り付けてあり、コースの側壁に当たるとその衝撃で車両自体が停止してしまうので、カーブが曲がれないといった欠点もあった。

そこで本研究では HW-UnitOne を改良した模型車「HW-UnitTwo」の設計・開発を行った。ただ、走行試験を兼ねて出場しようとしていた第 24 回スターリングテクノロジー HW クラスは、新型コロナウイルス感染拡大の影響から出場が叶わなかったもので、実際のコースを模倣したテストコースを用意して走行させた。本報では、製作した模型車の仕様や性能特性について述べると共に、テスト走行の結果などについて報告する。

2. HW-UnitOne の改良機 HW-UnitTwo について

序論で述べたように、HW-UnitOne は構造上の問題点があったのとカーブが曲がれないという大きな欠点があった。そこでこれらの問題をクリアすべく、設計・開発したのが Fig.2 に示す HW-UnitTwo である。HW-UnitTwo は α 型低温度差エンジンを搭載し、HW-UnitOne と同じく中央に配置したアクリル製

の支柱に取り付けたフライホイールを単クランク機構で回転させる構造を有した車両である。HW-UnitOne からの大きな変更点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。これにより車高は高くなったが、重力によるサイドスラストの影響が一切無くなるので性能向上が見込めるものと推察される。それに加えて重心の偏りが無くなるので、安定した走行が可能となるものと推察される。この縦置き型にするメリットはもう 1 つある。横置き型ではヒートキャップの伝熱面を完全にお湯で浸すためには、ある程度深さのあるお湯タンクが必要であり、製作の都合上タンクは大型化するので必然的にお湯の量も増える。それに対して、縦置き型であればお湯タンクの断面積は伝熱面の大きさと同じかそれよりもわずかに大きければ良いだけであるので、タンクを小型化でき、それに応じてお湯の量も少なくて済むので軽量化に繋がるという点である。

もう一つ変更点として、HW-UnitOne は中央に 1 本のアクリル製支柱があり、その両側に同径のフライホイールを 1 つずつ配置するという構造をしているのに対して、HW-UnitTwo はフライホイールを両



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

端支持の構造にした点がある。強度を持たせるために支柱の重量は増えてしまうが、慣性力の大きいフライホイールを 1 つ使用するだけで済むうえ、回転軸の重心の偏りも軽減でき、安定した回転が得られるという利点がある。

HW-UnitTwo の仕様を Table 1 に示し、詳細を以下に説明する。エンジンならびに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た。

エンジンの架台の製作法は HW-UnitOne と同じである。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ており、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、中央の 2 枚目のプレートには連結孔を設けて、貼りあわせた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した。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。

この架台を中央に配置した 2 枚のアクリル製プレートでできた支柱に取り付けた。アクリル製プレートは厚さ 2 mm であり、プレートの間隔は 11 mm である。プレートの間はアクリル板で補強して強度を持たせた。

Table 1 Specification of HW-UnitTwo.

Heating cylinder	Inside diameter	24 mm
	Length	36 mm
Heating side piston	Bore×Stroke	15 mm×15 mm
Displacer (Foamed styrol)	Diameter	22 mm
	Length	20 mm
Coolong side piston	Bore×Stroke	15 mm×15 mm
Dead volume		7574 mm ³
Phase difference		150°
Compression ratio		1.144
Size	Full length	130 mm
	Car width	80 mm
	Vehicle height	185 mm
Weight	Without hot water	129.0 gf
	With hot water	142.0 gf

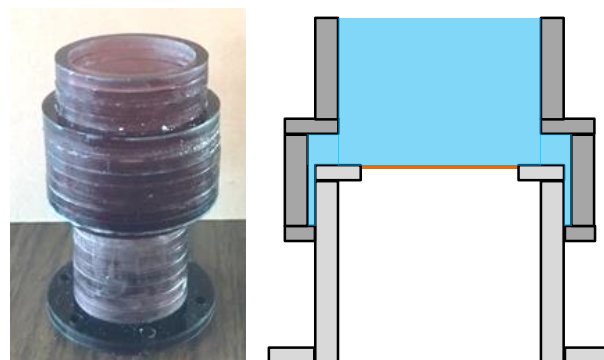


Fig. 3 Photograph and schematic view of heating cap.

次に Fig.3 にお湯タンクと一体型になったヒートキャップの外観と概略図を示す。ヒートキャップはお湯の熱をエンジンに伝える重要な部品であり、HW-UnitOne ではお湯の熱量を少しでも多く取り込めるように若干伝熱面を大きくするようにして初めてエンジンが作動したという経緯がある。HW-UnitTwo においても、HW-UnitOne のヒートキャップを参考にして製作した。まず、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た。そのヒートキャップにお湯タンクを取り付けたが、お湯タンクもアクリル板を積層して製作し、ヒートキャップの先端から 10 mm 分がお湯に触れるように接着固定した。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発泡スチロールで覆うという処置を施すようにしている。エンジン作動時にタンク内に供給するお湯の量は 13.0 gf であり、38.5 gf を入れて作動させていた HW-UnitOne に比べて、約 1 / 3 の量で走行できるようになっている。

Fig.4 は加熱側ピストンである。上述した通り、ヒートキャップの伝熱面を大きくしており、ピストン径の倍以上の内径となっているため、そのままではクリアランスが大き過ぎてエンジンは動かない。そ



Fig. 4 Photograph of heating-side piston.

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。なお、ヘッドのクリアランスは 1.5 mm とした。

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。ボアとストロークは Table1 の通りである。両ピストンは、ナックルジョイント、コンロッドを介してクランクディスクに直結させており、クランクディスク部で両ピストンに位相差を設けた。α 型低温度差エンジンでは、両ピストンの位相差を大きくして圧縮比を下げる必要があり、位相差は一般的な 90°ではなく、150°に設定している。これにより、本エンジンの圧縮比は 1.144 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ており、プーリー比は 1 : 6 とした。

スターリングテクノロジー 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-UnitTwo のサイズは全長 130 mm、車幅 80 mm、車高 185 mm となっている。車両の全重量は 129.0 gf (お湯を含めない場合) であり、お湯を含めると 142.0 gf である。お湯を含めない重量は HW-UnitOne の 103.7 gf に比べて増量されているが、お湯を含めた重量は HW-UnitOne が 142.2 gf であるので、ほぼ同重量に収めることができたといえる。

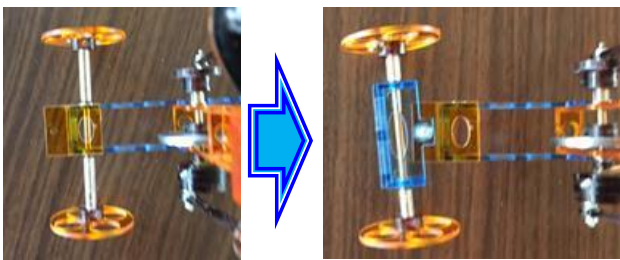
3. HW-UnitTwo の動作確認について

次に HW-UnitTwo の動作確認を行った。タンクにお湯を入れてフライホイールを回転させたところ、エンジンは自立回転を行い、無負荷状態 (フライホイールと後輪とはプーリーゴムでつないだ状態) でフライホイールの最高回転数 378 rpm が得られた。次に 3 号館 2 階の廊下 (屋内) にて走行試験を行ったところ、直線で 6.30 m を 59 秒間で走行した。平均速度は 10.7 cm/s であった。HW-UnitTwo においても、100°Cのお湯という低エネルギー源を動力利用することに成功したといえるだろう。なお、前報で開発した HW-UnitOne の無負荷状態におけるフライホイールの最高回転数は 200 rpm であり、同条件の走行試験では直線 8 m を 110 秒間で走行した。平均速度は 7.27 cm/s であった。HW-UnitTwo は HW-UnitOne に比べて回転数の増加と走行速度の上昇が確認でき、性能向上が図れたものと推察できる。一方、走行距離は 8.00 m から 6.30 m と減少した。これは搭載したお湯の量に違いがあるため、前章で述べたように、HW-UnitTwo が搭載するお湯の量は HW-UnitOne の約 1/3 の量であるからである。お湯 1 g あたりの走行距離で比較すれば、HW-UnitOne が 0.208 m であるのに対し、HW-UnitTwo は 0.485 m と 2 倍以上の走行距離となっている。

4. カーブを曲がる工夫について

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。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になる。当初 HW-UnitTwo は、Fig.5(a)に示すように前輪の向きが完全に固定された形になっており、真っ直ぐにしか走れない構造をしていた。そこで Fig.5(b)のように、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。

この模型車がカーブを曲がるためには、前部ガイドローラーが特に重要な部品となるガイドローラーがコースの側壁に当たった際の角度が悪くと、車両本体が大きな衝撃力を受けて停止してしまうことになる。試行錯誤の結果、Fig.6 の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



(a) Before

(b) After

Fig. 5 Improvement in the driven front wheel part.

り付け, それを前輪の車軸に対して 75° から 80° の角度になるように取り付けることで, なるべく前方でかつ壁に対して緩やかな角度で接触するようにしたところ, 壁に当たった際の衝撃を弱めることができ, カーブでも止まらずに走行することが可能となった. 低温度差エンジンカーをカーブでも走行できるようにするポイントはガイドローラーを側壁に当たる際の角度をいかに緩やかにするかにあると推察される. なお, ガイドローラーを取り付けるプレートを長くしすぎると前方が重くなって撓んでしまうという別の問題が発生するので, 適切な長さを見つけることが肝要であるように思われる.

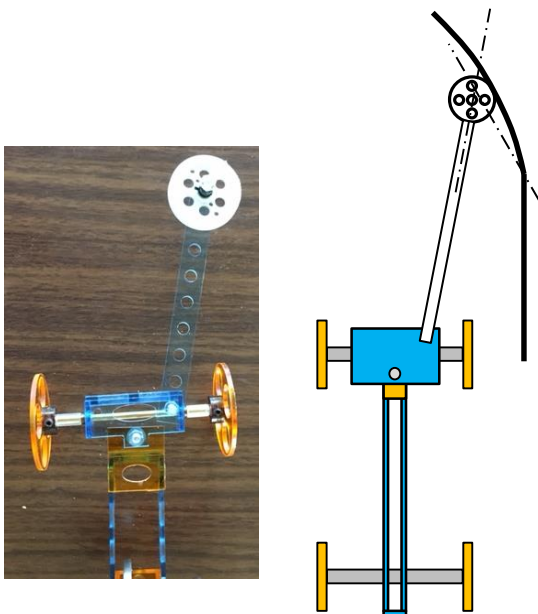


Fig. 6 Photograph and schematic view of guide roller.

5. スターリングテクノロジーについて

例年, 模型スターリングエンジンカーの走行試験を兼ねて, スターリングテクノロジー⁵⁾に出場しているが, 新型コロナウイルスの影響から参加を見送った. 第 24 回スターリングテクノロジーは 2020 年 11 月 21 日 (土) に茨城県にある土浦工業高等学校で開催されたそうである.

出場しようとしていた競技クラスは HW クラスである. HW クラスは 2019 年に新設されたクラスであり, 沸騰させた水道水を熱源として, Fig.7 に示すような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.

本研究では出場する代わりに実験実習棟 燃焼工学実験室内に同一のコースを用意してレースを行うことにした. その際, 上記のレース規定に従って実施した.

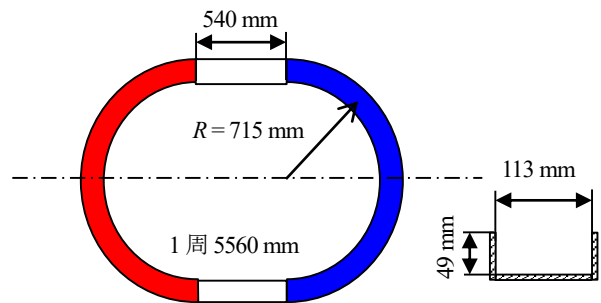


Fig. 7 The course of HW class in Stirling Techno-Rally.



Fig. 8 Photograph of the race state.

レースの様子を Fig.8 に示す。HW-UnitTwo はカーブでも止まることなく、88 秒間で 1 周と 0.5 ブロックを走行することに成功した。仮に第 24 回スターリングテクノロジーHW クラスに出場していたとすると、5 位入賞に該当する成績であった。一方で、3 分間を継続して走行することはできなかった。軽量化を重視した結果、搭載できるお湯の量があまりにも少なかったからであると考えられる。

レースを通じての所見として、HW-UnitTwo は軽量ではあるのだが、それでもエンジンの出力がこの車体を動かすには少し小さ過ぎる感があり、軽量を生かしてスピードを出すという α 型エンジンの特性が十分に生かし切れていない印象を受けた。加えて、3 分間を継続して走行できるだけのお湯を搭載できるようにする必要があるが、その分車両本体の重量が増えて、走行性能が落ちる問題が生じてしまうことが予想される。さらなる走行能力向上のために、エンジンを大型化して出力の増加を図るか、多気筒化で出力向上を図ると良いのではないかと考えている。

6. 結 言

少ないエネルギーを有効利用できるエンジンを開発することを目的に開発した HW-UnitOne に対して、それを改良した模型車「HW-UnitTwo」の設計・開発を行った。また、スターリングテクノロジーHW クラスを模擬したレースを実施した。その結果、以下の結言を得た。

1. HW-UnitTwo の大きな変更点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。これにより車高は高くなったが、重力によるサイドスラストの影響が一切無くなり、性能向上を図ることができた。また、それに加えて重心の偏りが無くなったことから、安定した走行が可能となった。
2. 平地で走行試験を行ったところ、HW-UnitTwo は直線で 6.30 m を 59 秒間で走行した。平均速度は 10.7 cm/s であり、HW-UnitOne に比べて走行速度の上昇が確認できた。一方、走行距離は減少したが、これは搭載したお湯の量が HW-UnitOne に比べて約 1/3 の量になったからであり、お湯 1 g あたりの走行距離で比較すれば、2 倍以上の走行距離となっており、エネルギー効率の観点からも性能向上が図れたと考えている。
3. 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方を工夫した結果、HW-UnitTwo をカーブで走行させることに成功した。
4. スターリングテクノロジーHW クラスを模擬したレースでは、HW-UnitTwo はカーブでも止まることなく、88 秒間で 1 周と 0.5 ブロックを走行することに成功した。

謝 辞

2020 年度卒業研修において、HW-UnitTwo 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) スターリングテクノロジー公式サイト, <<http://www.stirling.jp.org/>>, (参照 2021-08-27).