

## HW車両製作へのヒント その1

### 手のひらエンジンからHW

2021/12/17 小林義行

スターリングエンジンは温度差があれば動くので、お湯と室温との温度差で模型自動車くらいは走らせる。それを表現できるHWクラス競技は、スターリングテクノロジーの各種目の中で最もスターリングエンジンらしい競技と言えるでしょう。

また、発電所や工場など色々な場所で大量に捨てられている熱、「未利用」の熱を利用できる可能性から、持続可能なエネルギー利用に役立つ技術であることをアピールできます。

しかし、いざ実際にお湯で走る模型自動車を

作るうとすると、バーナーや燃料ランプで動くエンジンよりは条件が大変きびしいことが分かります。でも、低温度差スターリングエンジンの性質をよく理解すれば、平坦なコースを走るHWクラスの車両を作るのは難しくありません。



図1 第25回テクノロジー「HW ザウルス 2021」

#### 1. 低温度差という条件

沸騰したお湯 100、室温を 20 とするとその差は 80K です。内部の気体がエンジンの加熱プレート側に流れて 90 に加熱されたとします。次に冷却プレートに移動して 30 に冷やされたとします。この場合、気体にとっての温度差は 60K です。プレートの温度と内部気体との温度差があるのは当たり前です。温度差があるから熱が移動するのです。ジーンと気長に待っていれば温度差はしだいにゼロに近づきますが、それを待ってはいられません。これが熱機関、特に外燃機関の悩ましいところです。

実はこの温度差が熱機関の熱効率（熱の何%が仕事になるかの割合）の限界を決めるのです。理想的な熱機関の熱効率の最大値（カルノー効率）は次の式で表されます。

$$1 - \frac{T_C}{T_H} \quad \text{ただし、} T_H[\text{K}] \text{は高温側での気体温度、} T_C[\text{K}] \text{は低温側での気体温度 } T_H[\text{K}]$$

例えば、高温側 800 低温側 60 なら、カルノー効率は  $0.69 = 69\%$  と計算されます。これは理論的な極限值であって、実物はこれを超えることはありません。実物のエンジンはずっと低い値です。もし、この温度条件で実物のエンジンがカルノー効率の半分、熱効率 35%を達成したら、効率のすごく良いエンジンだね、ということになります。

では、私たちの課題、温度差 60K を当てはめると、カルノー効率は約 16.5%です。だから、もし半分の 8%の熱効率が出たなら、それはすごいです。

以上のように原理的に、温度の差が小さいと熱から取り出せる仕事の割合が非常に小さいという厳しさがあります。けれども、例え 1K の温度差であっても動くスターリングエンジンは可能です。次図は 2005 年に発売された低温度差スターリングエンジンの解説本付きのキットです。このキットの開発に私も協

力しましたが、温度差 20K でいどで動くものでした。真冬なら手のひらと室温の差で動きます。今では、もう少し感度が良く 10K でいどの温度差で動く精密な製品（輸入品）がたくさん出ています。



図2 学研大人の科学マガジン(左), 発売直前の試作品(未塗装のものと塗装後), 英国製「手のひらエンジン」(右)

## 2. 手のひらエンジンから

図3は手のひらエンジンの構造です。低温度差用なので、体積変化は小さく  $0.3\text{cm}^3$  程度であると思われます。熱再生器は設けず、流動抵抗を増やさない設計です。低回転でも停止しないよう、フライホイールには縁を真鍮にして慣性モーメントを十分確保しています。

この手のひらエンジンをお湯で温めれば走る模型車両が出来るかという、それはきびしいのです。外部に仕事を取り出すための最適な設計になっていないからです。

今まで小さな温度差で動くスターリングエンジン（以後 LTDSE と呼びます）の多くは、こんな低温度差でも回る、ということを見せるのが目的でした。だから、出力アップではなく摩擦ロスや流動抵抗にロスを少なくすることに注力した設計で良かったのです。

手のひらエンジンをお湯熱源で動かすと良く回るでしょうが、圧力変化は小さい上に、さらに出力ピストンの行程容積も小さいので、動力としてはきびしいのです。それでも摩擦ロスが少ないギヤなどで大きな減速比として車輪トルクを増やせば、前進できるはず。その場合、車速はとてもおそいでしょ。

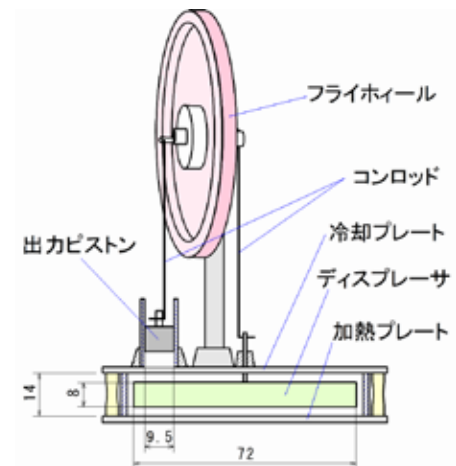


図3 手のひらエンジンの構造

## 3. 仕事を取り出せるエンジンに

10K や 20K でなく、60K の温度差に適應して HW クラスのエンジンは LTD とどのような点がちがうのでしょうか。平坦な走路を走る HW クラスでは、エンジンのする仕事といえば、ごくわずかな傾斜や凸凹のある路面やカーブのコース壁などから受ける走行抵抗に対する仕事だけです。しかし、エンジンが最低その仕事をできなければ周回できません。

図5は2018年第22回スターリングテクノラリーに クラスで出場し、第23回にHWクラスで走行した「HW-パイ」のエンジンスペックです。50cc 程度のお湯を熱源として、5.5m の周回コースをHWクラ

スの競技時間 3 分間の平均ラップタイム 10 秒で走行します。もちろんお湯が冷めるにつれて次第に速度は落ちますが 10 分以上は走り続けます。

LTDSE の定番である円盤を串刺しにしたような形のディスプレイサ（以後「串形ディスプレイサ」と呼ぶ）は踏襲しています。串形ディスプレイサは受熱面積、放熱面積が大きいのが特長です。

ディスプレイサの素材としてスポンジを使用する LTDSE も多いですが、空気がスポンジを通過する際の熱再生効果というよりも、流動抵抗を低減する効果があるからだと思います。本機ではディスプレイサには発泡スチロールを使い、その側面にスチールウールを巻いて、熱再生器としています。これは、ディスプレイサの変位（移動のこと）のたびに内部空気がスチールウールを通過することで、素早く深く加熱・冷却され、かつ熱再生が行われることを目的としています。金属の方が熱伝達に優れるので、グラスウールやスポンジよりスチールウールを採用しています。

移動する空気はすべてスチールウールを通して欲しいので、側壁との隙間はゼロにしたいのですが、側壁にスチールウールが接触すると摩擦力が発生します。適切な量と表面状態をさがす必要があります。この調整で性能が変わります。

スチールウールによって圧力変化が増加すると分かっているので、体積変化量（＝出力ピストンの行程容積）は約 2cm<sup>3</sup>と手のひらエンジンより大きくしました。これはもう少し増やせるようです。というのは、圧力変化に余裕が感じられるからです。しかし、ロスヨーク機構を使ったため、出力ピストン側のストローク量のみの変更はしづらく、そのままになっています。

ディスプレイサ	発泡ポリスチレン (円筒形)	容器直径×高さ	84mm×25mm
		ピストン直径×高さ	70mm×13mm
		ピストンストローク	11mm
		ピストン掃気容積	42cc
熱再生器	スチールウール (素線径約70μm)	容積	約15cc
パワーピストン	ホウ珪酸ガラス (10mL用注射器)	ピストン直径×ストローク	15.1mm×11mm
		ピストン掃気容積	2.0cc

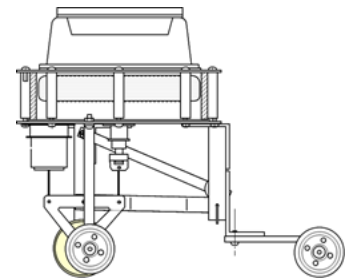


図 4 HW-パイ のエンジン諸元

## 4. まとめ

当たり前のことを言いますが、LTD スターリングエンジンが外部により大きな仕事をするには、圧力変化がより大きくなる必要があります。そのためには加熱器や冷却器を見直し、熱交換を増やす必要があります。そして、有効な熱再生器を設けることだと思います。上のスチールウールもその手段の一つです。圧力変化を大きく出来れば、出力ピストンの行程容積を適度に大きく設定して、より多くの仕事をさせることができます。

### その2 以降は次のような内容を取り上げる予定です。

- その2 Mクラス車両を HW クラス車両にコンバートするには
- その3 ディスプレサのロッドシール問題と異径2ピストンについて
- その4 HW クラスの共通課題(お湯熱源の温度低下、旋回方法、など)

以上の内容について質問等あれば、下記のアドレスあて電子メールでご連絡下さい。

小林義行(スターリングテクノラリー事務局) office@stirling-tech.sakura.ne.jp (@を1つ除いて下さい)