

## スターリングエンジンカー「燃焼 4 号機」の開発

竹内 誠一\*

### Development of Stirling Engine Car "Combustion Unit Four"

Seiichi TAKEUCHI\*

**Synopsis:** The model car "Combustion Unit four" having a simple structure in which a two-cylinder engine arranged in a V shape is driven by a single crank mechanism was developed. This model car is about the half in weight of the "Combustion Unit Three Twin", which is considerably lighter, and has the characteristics of easy maintenance. I participated in the RC class in the 26th Stirling Techno-Rally as well as a driving test of this model car. This model car was able to complete two laps. The official record was 83.23 s, and it was honored to finish in the 3rd rank in lap time. In addition, after the race, two improvements are made to the "Combustion Unit four", and as a result, I succeed in greatly improving the driving performance, and is able to update the best time at indoors in my laboratory.

**Key words:** Stirling engine, model car, Stirling techno-rally

#### 1. 緒 言

スターリングエンジンは、1816 年に Robert Stirling によって発明されたエンジンであり、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<sup>1)・3)</sup>。このエンジンは、後発のガス機関やディーゼル機関と比較して、重量当たりの出力が低いという問題があるが、理論熱効率の高さや、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<sup>4)・5)</sup>。

これまで本研究室ではスターリングエンジンの設計・開発研究を行っており、スターリングエンジンの動力利用を目的に、スターリングエンジンで走行する模型車を開発してきた。中でもロス・ヨーク機

構が持つサイドスラストの低減効果<sup>6)</sup>に着目し、 $\alpha$ 型エンジンを当該機構で駆動させ、その動力で走行する模型車「燃焼 3 号機」を継続的にバージョンアップしてきた。

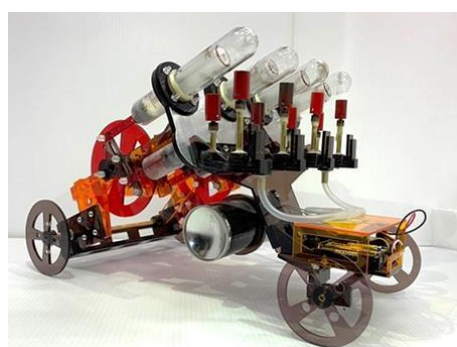
2020 年度の卒業研修では、重力によるサイドスラストの影響を軽減させるため、エンジンを横置き型から傾斜型に変えた「燃焼 3 号機 II」を開発した。2021 年度の卒業研修では、「燃焼 3 号機 II」のエンジンを 2 気筒から 4 気筒へ倍増させた「燃焼 3 号機 Twin」を開発した。Fig.1 と Fig.2 はそれぞれ「燃焼 3 号機 II」と「燃焼 3 号機 Twin」の外観である。

「燃焼 3 号機 Twin」は、単純に「燃焼 3 号機 II」に対して約 2 倍の出力を出すことが可能である。屋内の講堂でスターリングテクノロジー RC クラスのレースを模擬して走行試験を行った結果、「燃焼 3 号機 II」の走行タイムは 34.32 s であったのに対し、体育館で実施した「燃焼 3 号機 Twin」の走行タイムは 32.89 s であった。実施場所が異なるために単純な

\*産業技術短期大学 教授 博士 (工学) 機械工学科



**Fig. 1** Structure appearance of Stirling engine car  
「Combustion Unit Three version II」.



**Fig. 2** Structure appearance of Stirling engine car  
「Combustion Unit Three Twin」.

比較はできないが、気筒数増加により走行性能の向上が図られたといえる。

一方で、「燃焼 3 号機 Twin」の全重量は 1.350 kgf であり、これは「燃焼 3 号機 II」の 1.97 倍の重量に匹敵しており、気筒数が倍になって出力向上が図られたが、パワーウェイトレシオを勘案すると、車両本体の走行性能が十分に向上したとは言えない状況であると推察された。加えて、ロス・ヨーク機構は駆動機構の部品点数が多く、メンテナンスに非常に時間が掛かるという問題もあった。

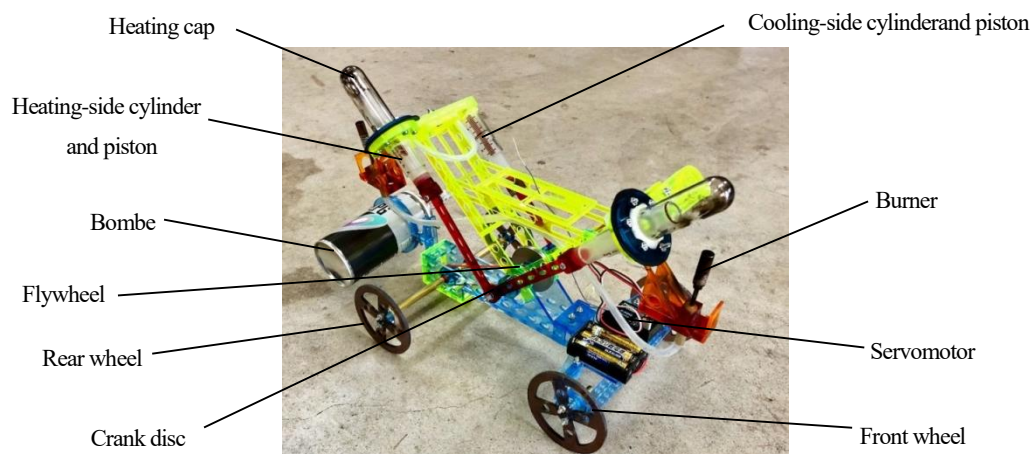
このようなことから方針を転換し、駆動機構をロス・ヨーク機構からシンプルな単クランク機構へ変更することにした。過去に設計・開発したスターリングエンジンカーにおいて、単クランク機構で駆動したものとしては 2019 年度の「Thomas-UnitOne」がある。第 23 回スターリングテクノロジーRC クラスにおいて完走を果たし、7 位にランクされた実績を持つ機体であるが、単気筒エンジンであったので、走行性能は同時期に開発された「燃焼 3 号機・改」

よりも劣っていた。しかし、これも多気筒化すれば走行性能の向上を図ることが期待でき、シンプルな構造でメンテナンスしやすい機体を開発できる可能性が高い。また、エンジンを多気筒化するに際しては、お湯で走行するスターリングエンジンカー「HW-αTwins」<sup>7)</sup>で実績がある V 字型式を採用すればピストンのサイドスラストの低減も期待できる。これらを踏まえて本研究では、「Thomas-UnitOne」の設計条件を参考にして、V 字型に配置した 2 気筒エンジンを単クランク機構で駆動させる構造を持つ「燃焼 4 号機」の開発を行った。また、走行試験を兼ねて第 26 回スターリングテクノロジーRC クラスに出場した。本報では、開発した「燃焼 4 号機」の仕様や走行性能を報告すると共に、スターリングテクノロジーの結果等について報告する。

## 2. 「燃焼 4 号機」について

Fig. 3 は設計・開発した「燃焼 4 号機」の外観であり、Table 1 はエンジン各部の寸法と仕様を示したものである。「燃焼 4 号機」の大きな特徴は、2 つの  $\alpha$  型エンジンを V 字型に配置した構造になっており、コンロッドを介して 1 つのフライホイールを回転させるシンプルな駆動機構が採用されている点にある。エンジンの傾斜角は  $45^\circ$  であり、これによってピストンのサイドスラストをなるべく軽減できるようにしてある。エンジンの出力はプーリーを介して後輪の駆動軸に伝えており、前輪部で車両の遠隔操縦が行えるようになっている。これまでの「燃焼 3 号機」シリーズに比べて駆動機構の部品点数が少なく、メンテナンスしやすい機体であるといえる。

次にエンジンならびに車両本体の詳細を説明する。軽量化と加工の容易さを鑑みて、ほぼ全てがアクリル製である。エンジン架台については、厚さ 2 mm のアクリル製プレート 3 枚を貼りあわせて製作した。それぞれ上面プレート、中間プレート、下面プレートと呼称する。下面プレートには加熱シリンダーと冷却シリンダーをはめ込んで接着固定し、上面プレートにはヒートキャップをゴムパッキンと共に取り付けた。さらに、補強のため、上面プレートには厚さ 2 mm のアクリル板 1 枚を上から貼りあわせてある。「燃焼 3 号機」では、中間プレートに連結孔を設けて、架台の内部で膨張空間と圧縮空間とを繋いでいたが、本機では下面プレートに穴を開け、そこに



**Fig. 3** Detail of structure of 「Combustion Unit Four」 .

**Table 1** Specification of 「Combustion Unit Four」 .

Heating cap	Inside diameter	18.4 mm
	Length	63.5 mm
Heating side piston	Bore × Stroke	15.0 mm × 25.0 mm
Coolong side piston	Bore × Stroke	15.0 mm × 25.0 mm
Dead volume		4036 mm <sup>3</sup>
Phase difference		90°
Compression ratio		1.85
Size	Full length	310 mm
	Car width	160 mm
	Vehicle height	210 mm
Weight	With bombe and battery	737.0 gf

連結用のビニールチューブを取り付けて 2 つの空間を繋ぐようにした。これは連結部分をエンジン架台の外に出すことで、冷却性能の向上を狙ったものである。連結チューブは内径 3.0 mm、長さ 19.0 mm となっている。

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。シリンダーの長さは加熱側が 28.4 mm、冷却側が 46.3 mm であり、ピストンの長さは加熱側が 102.0 mm、冷却側が 62.7 mm である。ボアは 15.0 mm で、ピストンのストロークは 25.0 mm としたので、行程容積は加熱側・冷却側共に 4418 mm<sup>3</sup> である。ヒートキャップには外径 21.0 mm、内径 18.4 mm のガラス製試験管を用い、63.5 mm の

長さに切断して使用した。ヘッドのクリアランスは 12.0 mm となっており、ガラス製試験管内径と注射器内筒の間のクリアランスは 1.7 mm であるので、ヒートキャップ内死容積は 1938 mm<sup>3</sup> となっている。これに連結部死容積を含めて圧縮比を求めると 1.850 である。なお、本エンジンの作動流体は大気圧空気である。

加熱側ピストンならびに冷却側ピストンは、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へ連結した。フライホールには、直径 44.5 mm、厚さ 3.8 mm のステンレス製円盤を用いている。また、軸受けにはミニチュアベアリングを使用し、回転時の摩擦抵抗を軽減させた。上述した通り、2 気筒分のエンジンの動力でもって、上記のフライホー

ルを回転させており、加熱側ピストンと冷却側ピストンの位相差は  $90^\circ$  としている。

上記のようにして製作したエンジン部を車体前後方向に各  $45^\circ$  の角度を持たせて取り付けた。車両本体を走行させるに際しては、2 本あるヒートキャップを同時に加熱する必要がある。そこで、加熱用バーナーを自作した。Fig.4 はバーナーの外観である。市販のガストーチ（トーチバーナー、Werstand 製）の先端部分を切断し、これをアクリル製のバーナー台に接着固定して製作した。なお、ヒートキャップ 1 つに対して 1 本のバーナーで加熱させるようにしており、ガスボンベとバーナーはビニールチューブで連結した。なお、燃焼用ガスには LPG を使用した。



Fig. 4 Burner for heating.

スターリングテクノラリーRC クラスでは、遠隔操縦により走行させる必要がある。ステアリングは前輪と連結したサーボモーターで行うことにした。なお、サーボモーターは小型のモーター（WonderKit WR-MG90S）を用い、軽量化を図っている。一方、上述した通り、車体の駆動は後輪で行う。エンジンの動力はプーリーを介して後輪軸に伝達しており、プーリー比は後述するが  $1 : 1.25$  とした。

ラジコンのサーボモーターを動作させるための電池（単 4 型 3 本）やガスボンベを含めて、「燃焼 4 号機」の全重量は  $0.737 \text{ kgf}$  となっている。緒言でも述べたが、「燃焼 3 号機 Twin」の総重量が  $1.350 \text{ kgf}$ （電池・ガスボンベも含む）であり、比較すると約半分程度の重量となっている。

### 3. スターリングテクノラリーについて

次に、「燃焼 4 号機」の走行試験を兼ねて、第 26 回スターリングテクノラリー<sup>8)</sup>に出場した。テクノラ

リーは 2022 年 11 月 12 日（土）に東京都にある都立練馬工業高等学校で開催された。

出場した競技クラスは RC クラスである。RC クラスは、Fig.5 に示すように、一般舗装路面において、遠隔操縦により約  $12 \text{ m}$  の間隔に置かれた 2 つのコーンを図に示す向きに周回し、2 周回すなわち約  $50 \text{ m}$  を走行する時間を競うクラスである。図中にはコースが描かれているが、走行用のコースは設けられておらず、コーンの外側を通過さえすればよいことになっている。また、スタートラインより手前であればどこからスタートしてもよく、車両がスタートラインを通過したところから計時を始める。なお、タイムアタックのチャンスは 2 回あり、記録には良かった方のタイムが採用される。車両に関する規定としては、停止時・走行時に関わらず自立できる構造で、遠隔操縦ができることとなっている。また、熱源の搭載は自由であり、車両のサイズもコースを安全に周回できるサイズであればよく、エンジンの形式や気筒数などについても一切の規定がない。

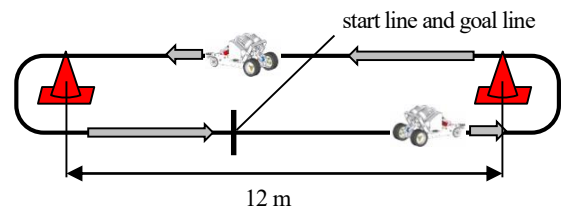


Fig. 5 The course of RC class in Stirling Techno-Rally.

Fig.6 にレース時の様子を示す。今年度の RC クラスの走路は平坦で滑らかな路面ではなく、勾配を有したコンクリートの路面であった。当初、プーリー比を  $1 : 1$  に設定しようとしたが、本番前の試験走行においてエンジンが停止してしまうトラブルに見舞われた。そこで、完走することを第一目標に掲げ、スピードは落ちるがプーリー比を  $1 : 1.25$  に設定した。また、レースにおいても、少しタイムを犠牲にはするが勾配を極力回避するようにして走行させた結果、2 周回を無事完走させることができた。結果は 2 回目のタイムアタックで記録した  $83.23 \text{ s}$  が正式記録となり、Table 2 に示す通り、見事 3 位に入賞し、表彰された。

一方で、「燃焼 4 号機」は完走を果たしたものの、1 位 2 位のタイムと比較するとその差はかなり大き



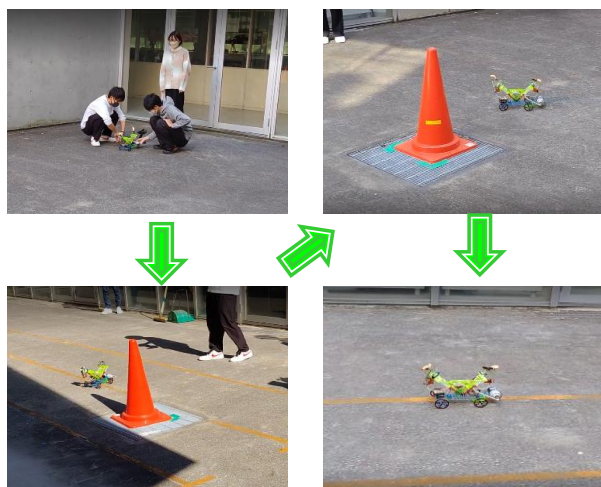


Fig. 6 Actual state of the race.

Table 3 Official results of RC class in 26th Stirling Techno-Rally<sup>8)</sup>.

Ranking	Result	Team name
1	28.29 s	P7
2	49.54 s	2019RC 改
3	83.23 s	燃焼 4 号機

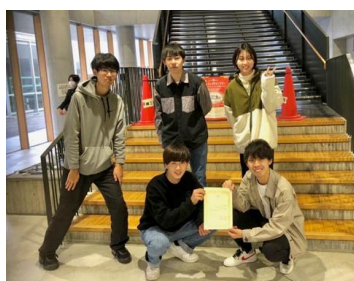


Fig. 7 Commemorative photo at the time of awarding the 3rd rank in lap time.

いものであった。スターリングテクノラリーRCクラスはコースが設置されておらず、当日の会場入りまで路面の状況を把握できない問題がある。今回、昨年度の経験から当日は屋外コースであることを想定し、風が吹く状況下でも走行可能であることをあらかじめ確認していたが、路面の勾配などの要素まで想定していなかったため、トルク不足を露呈してしまったと考えている。今回の結果を受けて、現在の軽さを維持しつつ出力向上に取り組み、更なる走行

性能の向上を図っていく必要があると思われる。

#### 4. 「燃焼 4 号機」の改良について

##### 4.1 改良法について

スターリングテクノラリーの結果を受けて、「燃焼 4 号機」の更なる性能向上を図ることができないか検討し、一部改良を加えることにした。

まず 1 つ目として加熱用バーナーについて検討した。ヒートキャップをなるべく高温で加熱することが望ましいが、「燃焼 4 号機」に使用しているヒートキャップはガラス製であるので、火炎を予混合化して高温で加熱すると破損するという問題が生じる。そのため、現状の拡散火炎を予混合化するという方策は採用できない訳であるが、バーナーの位置を調整することで現状よりも効果的に加熱できるようになる可能性がある。Fig.8(a) に示すように、改良前ではバーナー先端がヒートキャップから離れており、またヒートキャップの先端付近のみを加熱するようになっていた。そこでこれを Fig.8(b)に示すように、バーナーの高さを 5.0 mm 分高くし、またバーナーの取り付け位置を 4.5 mm 分だけ本体に近付けるように改良した。これによって、火炎がヒートキャップに近い位置で形成されるようになり、また加熱される領域も広がって、先端から 1/3 ぐらいの領域が加熱されるようになった。このバーナー位置の改良により、現状に比べて「燃焼 4 号機」の性能向上が見込めるものと推察される。



(a) before improvement (b) after improvement

Fig. 8 Changing the mounting position of the heating burner.

2 つ目として圧縮比について検討した。一般的に圧縮比を高くすればエンジンの出力が向上する。圧縮比を上昇させるには、一般にボアアップやピストンストロークの変更によって行程容積を増やす方法が採られるが、死容積を低減させることでも圧縮比

を上昇させることができる。改良前は加熱側ピストンの外径 15.0 mm に対して、ヒートキャップに使用しているガラス製試験管の内径が 18.4 mm と少しクリアランスが大きいことが判明したので、試験管を内径 16.0 mm のものに変更してヒートキャップ内死容積の低減を図った。改良前と改良後のエンジンの仕様を Table 4 に示す。ヒートキャップの内径が 2.4 mm 減少することにより、ヒートキャップ内死容積は 2987 mm<sup>3</sup> から 2196 mm<sup>3</sup> へ減少した。これに伴って圧縮比は改良前の 1.85 から 2.00 へと上昇し、上昇率は約 7.6 % となった。加えて、ヒートキャップの変更は圧縮比を上昇させる効果だけではなく、試験管の肉厚が 1.3 mm から 1.0 mm と薄くなっていることから、内部の空気がより加熱しやすくなる効果も期待できた。一方で技術的な問題として、ヒートキャップとピストンの間のクリアランスが 1.0 mm しかないため、両者が接触する危険性があったが、加工精度を高めることでこの変更を実現することができた。

**Table 4** Change in engine specifications  
(for one cylinder)

		Before	After
Heating cap	Outside diameter	21.0 mm	18.0 mm
	Inside diameter	18.4 mm	16.0 mm
Dead volume of heating cap		2987 mm <sup>3</sup>	2196 mm <sup>3</sup>
Compression ratio		1.85	2.00

#### 4.2 改良後の性能比較について

改良前と改良後の性能比較を行った。まず、無負荷状態でのエンジンの最高回転数を比較したところ、改良前では最高回転数が 670 rpm であったのに対し、改良後は 1250 rpm となり、約 2 倍の最高回転数を出すことができた。今回、バーナー位置の変更、圧縮比の上昇、ヒートキャップの肉厚の低減と 3 つの性能向上の要素があり、いずれの変更が最も効果的であったのかは甚だ不明であるが、少なくとも改良によってある一定の性能向上が実現できたといえるだろう。

次に走行性能の比較を行った。Table 5 に体育館（屋内）で実施した走行試験の結果を比較したものを示す。なお、この走行試験はスターリングテクノ

ラリー RC クラスの方法に準拠して行った。改良前と改良後で最高タイムを記録したプーリー比は違っているが、最高タイム自体を比較すると改良前が 36.00 s であったのに対して、改良後は 28.60 s と 7.40 s も短縮することができた。なお、「燃焼 3 号機 Twin」が同じ体育館で走行試験を実施した際のタイムは 32.89 s であり、それよりも早いタイムであった。これまで本研究室で開発してきた RC 用スターリングエンジンカーの中で、屋内で出した最高タイムである。

屋外の 2F 渡り廊下でも同様に走行試験を実施したところ、改良前が 57.96 s であったのに対して、改良後が 41.80 s となっており、16.16 s のタイムアップが実現できた。屋外の場合、気温や風の有無といった周囲環境の影響を大きく受けるため単純に比較はできないが、それでも走行性能が大幅に向上したといえる。

本研究で開発した「燃焼 4 号機」は、過去の「Thomas-UnitOne」を参考に設計されたものであるが、さらなる小型化、軽量化をすることで性能向上が見込めるものと推察される。同時に、車輪部にサスペンションを導入することで、走行時の衝撃を弱めることも検討している。これらは今後の課題としたい。

**Table 5** Comparison of driving test results  
conducted in a gymnasium (indoor)

pulley ratio	Before	After
1 : 0.9	not implemented	36.10 s
1 : 1.0	<b>36.00 s</b>	33.60 s
1 : 1.25	39.00 s	<b>28.60 s</b>
1 : 1.5	not implemented	29.80 s

## 5. 結 言

本研究では、2019 年度の卒業研修で設計・開発したスターリングエンジンカー「Thomas-UnitOne」を参考に、シンプルな単クランク機構で駆動し、且つ、2 気筒化した「燃焼 4 号機」の設計・開発を行った。また、走行試験を兼ねて第 26 回スターリングテクノロジー RC クラスに出場した。その結果、以下の結果を得た。

1. 開発した「燃焼 4 号機」の大きな特徴は、2 つの  $\alpha$  型エンジンを V 字型に配置した構造になっており、コンロッドを介して 1 つのフライホイールを回転させるシンプルな駆動機構が採用されている点にある。これまでの「燃焼 3 号機」シリーズに比べると、駆動機構の部品点数が少なく、メンテナンスしやすい機体であるという特徴がある。
2. 第 26 回スターリングテクノラリー RC クラスでは、完走を果たすことを第一目標と掲げ、プーリー比を 1 : 1.25 に設定すると共に、路面の勾配を極力回避して走行させた結果、2 周回を完走することができた。正式記録は 83.23 s であり、見事第 3 位に入賞して表彰された。
3. スターリングテクノラリーの結果を受けて、「燃焼 4 号機」の改良を行った。改良として、バーナー位置の変更とヒートキャップのサイズ変更を行った。前者の改良によって加熱効果の改善が図られ、後者の改良によって圧縮比が上昇した。この 2 つの改良により「燃焼 4 号機」の走行性能を大きく向上させることに成功し、これまでの本研究室における屋内での最高タイムを更新した。

#### 謝 辞

2022 年度卒業研修において、「燃焼 4 号機」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。また、筆者に代わり、現地まで学生を引率頂いた堀靖仁講師に深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 兵頭務, 米田裕彦: スターリングエンジン (その生い立ちと原理), パワー社, 1990.
- 2) 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.
- 3) 浜口和洋, 松尾政弘, 平田宏一, 戸田富士夫, 岩本昭一: 模型スターリングエンジン, 山海堂, 2000.
- 4) 迹目英正, 八木田浩史, 角田晋也, 伊藤拓哉, 鈴木誠一, 小島紀徳: 太陽熱水発電における低温スターリングエンジンの実現可能性に関するシナリオ分析による定量的評価, [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmr/33/1/33\\_1/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmr/33/1/33_1/_pdf/-char/ja), (参照 2023-8-8).
- 5) 関谷弘志, 石川賢, 第 22 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, **22**(2019) 27-34.
- 6) 戸田富士夫, 白木輝正, 芹沢嵩, 谷口周平, 廣木加奈子: 第 10 回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, **15**(2012)69-70.
- 7) 竹内誠一: 産業技術短期大学誌, **56**(2023)71-76.
- 8) スターリングテクノラリー公式サイト, <http://www.stirling.jpn.org/>, (参照 2023-8-8).