

ビー玉スターリングエンジンの動作時間

～ ビー玉の配列および加熱時間との関係 ～

長田 温仁 久保 由春 中條 郁仁 津村 魁飛

1. 要旨, 概要

スターリングエンジンとは熱機関のひとつである。内部と外部の温度差を利用して内部の気体の体積を変化させ、ディスプレイサピストン、パワーピストンを動作させることによって仕事をする。熱効率は非常によく、構造も単純である。しかし、大規模なものをつくるには多くの技術、費用が必要であるため、他の熱機関（ディーゼルエンジン、ガソリンエンジン等）に比べて利用される場面は少ない（現在は潜水艦等に使用されている）。

ディスプレイサピストンとは熱機関内の気体を移動させ、圧力を変化させる役割を持つピストンである。極めて小さい力で動く。本実験ではビー玉がこの役割を担っている。

パワーピストンとはディスプレイサピストンの働きによって圧力が最大となる時駆動力を得て動作するピストンである。本実験では注射器がこの役割を担っている。

動作の仕組み

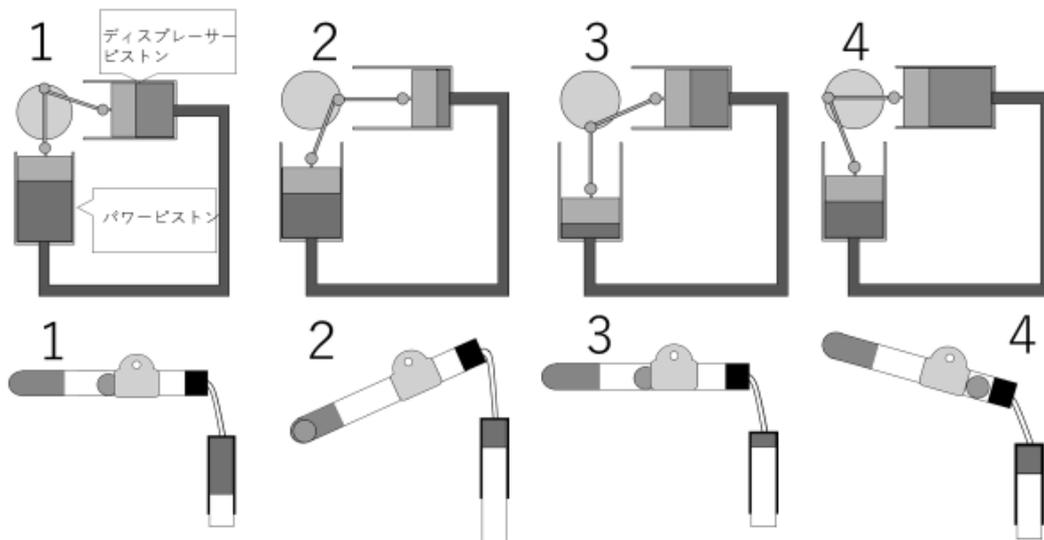


図1 動作の仕組み

- 1.ディスプレイサピストン部が熱源によって加熱される。
 - 2.ディスプレイサピストン部の空気が膨張してパワーピストン部に流れ込む。
 - 3.パワーピストン部で空気が冷却される。
 - 4.パワーピストン部の空気が収縮してディスプレイサピストン部に流れ込む。
- この一連の1～4の過程を繰り返して動作する。

先行研究について

北山ら (2020) の「ビー玉スターリングエンジンの動作時間とビー玉の個数の関係」¹⁾の実験の結果より、ビー玉が4個以下のときは、試験管内の気体の体積が大きくなりすぎて、温度が上がりづらくなる。また、ビー玉が6個以上のときは、気体が膨張したとき、注射器内が気体で満たされ、持ち上がったままになる。そのためあまり動作しない。動作の維持には、外部との熱交換と外部にする仕事とのバランスが保たれている必要が

あり、この条件を満たすのは、ビー玉 5 個のときであるということが分かっている。そこで、私たちの研究で用いるビー玉スターリングエンジンの内部のビー玉も 5 個に設定して実験を行った。

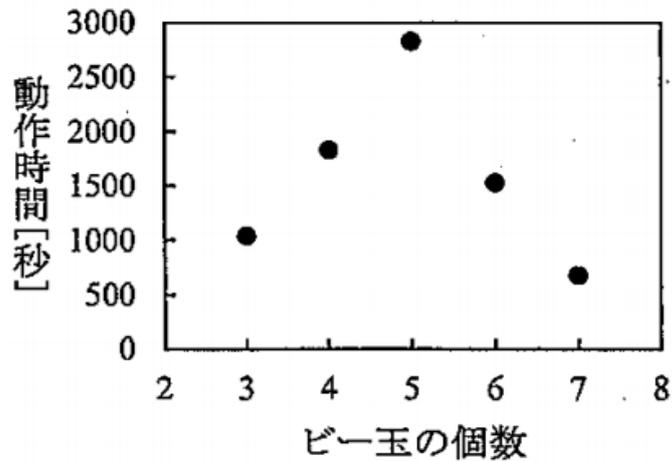


図2 ビー玉の個数と動作時間の関係 (北山ら (2020) より抜粋)

本研究における結果

はじめに、私たちは、ビー玉 5 個のスターリングエンジンにおける、最も動作時間の長くなるビー玉の配列を模索した。その結果、試験管の底から順に、①最も質量の大きい 4.20[g] のビー玉、②質量の小さい 1.60[g] のビー玉、③質量の小さい 1.60[g] のビー玉、④質量の大きい 2.60[g] のビー玉、⑤質量の小さい 1.60[g] のビー玉と配列したときに最も長く動作した。

次に、上記のビー玉の配列における動作をより長く維持するために、手動でアルコールランプを一定時間試験管に近づけたり (加熱)、離したりする (冷却) 操作を繰り返し、最適な加熱時間と冷却時間の関係を調べた。その結果、加熱時間 15[s]、冷却時間 5[s] のとき動作時間が 3804[s] と最も長く動作することが分かった。

2. 問題提起, 研究目的

5 個のビー玉の質量, 配列を変えてエンジンの動作時間の変化について調べる。さらにその中から、特に長時間動作したものを、最低限の加熱で動作時間を向上させ、最適な条件を調べることを目的とする。

3. 実験方法 1

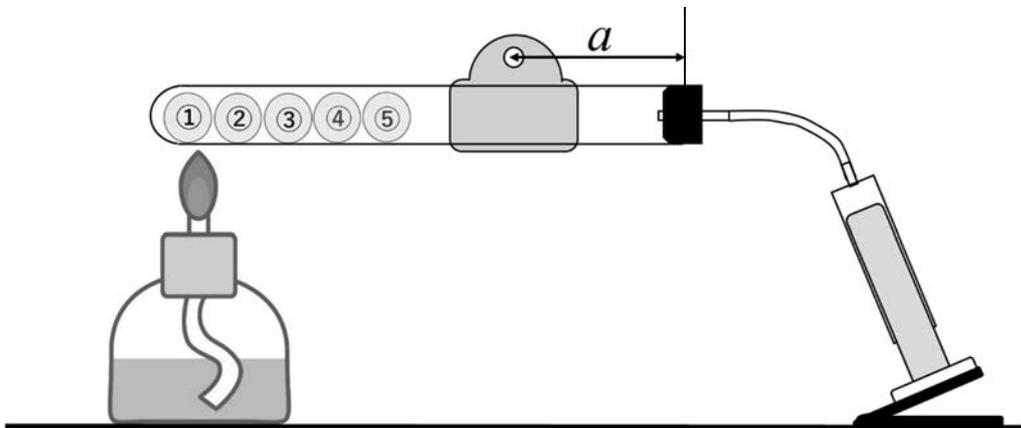


図3 ビー玉スターリングエンジンの図

実験1：ディスプレイサピストンとなる球の質量，配列の最適条件を調べる。

準備物

<ディスプレイサピストン部>

ビー玉 (表1 参照)

試験管 (長さ 18.0[cm]・内径 1.8[cm])

ガラス管 (長さ 5.0[cm]・内径 0.2[cm])

<パワーピストン部>

注射器 (8.0[mL], ガラス製)

ゴムチューブ (長さ 6.0[cm]・内径 0.3[cm])

アルコールランプ

スタンド

鉄球 (表2 参照)

目玉クリップ

ゴム栓

プラスチック段ボール

両面テープ

チャッカマン

タイマー

表1 ビー玉の直径と質量

直径[cm]	質量[g]
1.00	1.50
1.05	1.60
1.10	1.64
1.25	2.60
1.50	4.20

表2 鉄球の直径と質量

直径[cm]	質量[g]
1.00	4.08
1.10	5.40
1.20	7.05
1.30	8.95
1.40	11.2

実験方法

1. スタンドを水平な台に置き，クリップ部分に直径約5mmの棒をはさみこむ。
2. 試験管をワニロクリップにはさみこむ。
3. 試験管の中にビー玉を5個入れ，ゴム栓をする。
4. 3のゴム栓に穴をあけ，ガラス管を差し込む。
5. ガラス管の先にゴムチューブを取り付ける。
6. 5のゴムチューブのもう一端に注射器を取り付ける。
7. プラスチック段ボール(5[cm]角)を半分に折り曲げる。
8. 注射器の底につけ，台に固定する。
9. ワニロクリップの穴を，1の棒に差し込む。
10. アルコールランプで試験管を加熱しパワーピストンを手で動かし動作を開始する。
11. 動作時間はスターリングエンジンの動作が安定し始めた後10[s]経ってから動作時間の計測を始める。
12. a の長さ，球の質量配列を無作為に変えて最も動作時間が長くなるパターンを探す。
(a を変えることで支点の位置が変わり動作する時間が変化するため)

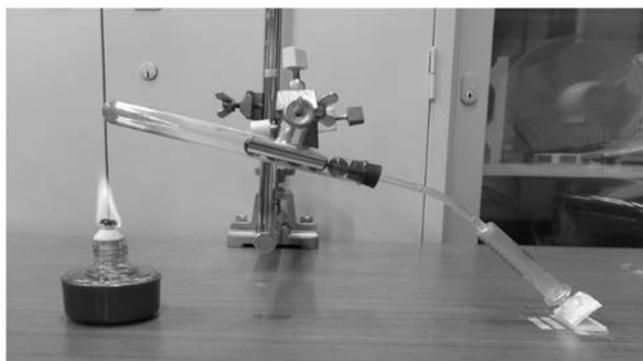


図4 実験の様子

4. 結果 1

表3 ビー玉の配列及びaの長さとの関係

ビー玉①~⑤の条件 [cm ; g]					a [cm]	動作時間[s]	その他
①	②	③	④	⑤			
1.30 ; 8.95	1.50 ; 4.20	1.25 ; 2.60	1.05 ; 1.60	1.40 ; 11.2	6.2	0	全く動かず
1.30 ; 8.95	1.30 ; 8.95	1.05 ; 1.60	1.30 ; 8.95	1.30 ; 8.95	7.5	0	全く動かず
1.20 ; 7.05	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.30 ; 8.95	1.30 ; 8.95	8.1	0	全く動かず
1.50 ; 4.20	1.00 ; 1.50	1.50 ; 4.20	1.00 ; 1.50	1.50 ; 4.20	7.1	0	全く動かず
1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	6.5	95	非周期的に運動した
1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	6.8	0	全く動かず
1.40 ; 11.2	1.40 ; 11.2	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	6.7	21	試験の底から2cm程の間を往復
1.40 ; 11.2	1.05 ; 1.60	1.25 ; 2.60	1.05 ; 2.60	1.40 ; 11.2	6.4	0	全く動かず
1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.40 ; 11.2	1.40 ; 11.2	8.2	0	全く動かず
1.05 ; 1.60	1.25 ; 2.60	1.50 ; 4.20	1.00 ; 4.08	1.40 ; 11.2	7.4	32	試験管の口から3cmほどの間を往復
1.10 ; 5.40	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	6.4	48	動くまでに時間がかかる
1.20 ; 7.05	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	1.50 ; 4.20	6.4	0	全く動かず
1.20 ; 7.05	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	6.4	10	試験管の底から2cmほどの間を往復
1.30 ; 8.95	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	6.4	25	試験管の底から3cmほどの間を往復
1.20 ; 7.05	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.10 ; 1.64	5.5	5	試験管の底から2cmほどの間を往復
1.30 ; 8.95	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.10 ; 5.40	1.25 ; 2.60	5.5	301	試験管の底部から口までの間を往復
1.30 ; 8.95	1.10 ; 1.64	1.25 ; 2.60	1.20 ; 7.05	1.25 ; 2.60	5.5	0	全く動かず
1.00 ; 4.08	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	1.25 ; 2.60	5.5	3	ビー玉が速く動き、バランスが崩れた
1.50 ; 4.20	1.10 ; 1.64	1.10 ; 1.64	1.25 ; 2.60	1.10 ; 1.64	5.5	334	試験管の底部から口までの間を往復
1.50 ; 4.20	1.05 ; 1.60	1.05 ; 1.60	1.25 ; 2.60	1.05 ; 1.60	5	392	試験管の底部から口までの間を往復

※表について

① ~ ⑤ : 図3のビー玉①~⑤にそれぞれ対応している。

ビー玉の条件 : [直径[cm] : 質量[g]] を示している。

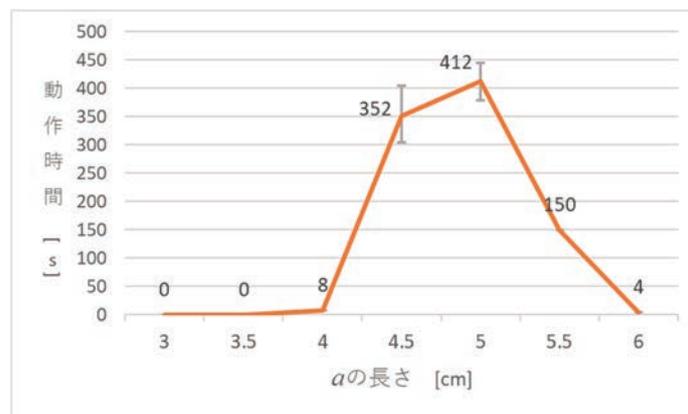
色 : 5個のビー玉の組み合わせの中での質量の大きさを表している。
(大きい順に●●●●●)

その他 : 主に動作の様子を表している。

水色の枠内の3パターンのすべての共通点として、ビー玉の質量の大きさの順番が①が最も重く、④が2番目に重く、②③⑤が軽くなっている。

また、同じ質量比でも全体がより軽いほうが、動作時間が長くなった。

グラフ1は表3の赤枠内のパターンを用いてaの長さを変えた時の結果である。



グラフ1 aの長さとの関係

5. 考察1

【実験①】

⑤の位置に設置したビー玉の質量を M 、接触直前の速度を V 、接触後の速度を V' 、⑤のビー玉が④のビー玉から受ける力の大きさを F 、接触時間を Δt とすると、運動量と力積の関係から $MV + F\Delta t = MV'$ という式が導き出される。この時 M 、 V 、 F 、 Δt を定数とすると M がより小さいと V' がより大きくなることがわかる。よって軽いビー玉を⑤に設置することで⑤のビー玉が速く動き試験管全体のバランスを取っているのではないかと考えた。

先行研究では 3000[s] 近く動作を維持したのに対し、実験 1 では、約 400[s] しか動作しなかった。これは、試験管の底の上下動が小さく、熱源から試験管があまり離れなかったことにより冷却が適切に行われず、試験管内の空気が膨張しきったためだと考えた。

そのため、熱源をスターリングエンジンから離すことによって、冷却をすることができるのではないかと考えた。そこで、同じ装置を使い、6分間加熱し続けたものと、15[s]加熱した後、5[s]加熱せずに冷却するという操作を6分間繰り返したものとでどれほど温度に差があるのか、サーモグラフィを用いて比較した。結果は、以下の写真のようになり、熱源を適度に離すことで動作時間が向上すると予想し実験2を行うことにした。

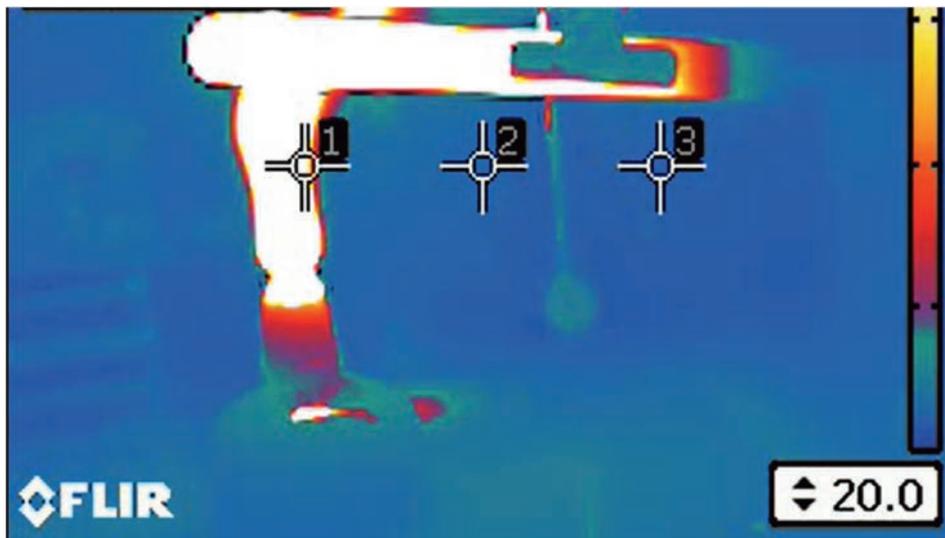


図5 冷却なしの場合



図6 冷却ありの場合

※図5, 6の白い部分が最も高温になっている場所を示す。

6. 実験方法2

実験2：冷却による動作時間の向上

準備物

<ディスプレイサピストン部>

ビー玉5個 (①4.20[g], ②1.60[g], ③1.60[g], ④2.60[g], ⑤1.60[g])

試験管 (長さ 18.0[cm]・内径 1.8[cm])

目玉クリップ

ガラス管 (長さ 5.0[cm]・内径 0.2[cm])

ゴム栓

<パワーピストン部>

注射器 (8.0[mL], ガラス製)

プラスチック段ボール

ゴムチューブ (長さ 6.0[cm]・内径 0.3[cm])

両面テープ

アルコールランプ

チャッカマン

スタンド

タイマー

実験方法 実験1で最も動作したビー玉, 配列, a の長さを用いる。

①実験1と同様のセッティングをする。

②ビー玉スターリングエンジンが安定して動作するまで加熱する。

③アルコールランプを試験管に t_2 [s]間近づけて加熱した後 t_1 [s]間離し冷却する。

④このサイクルを繰り返し, 動作時間を測定し, 412[s]を超えたものに関して3回実験を行いその平均値をとる。

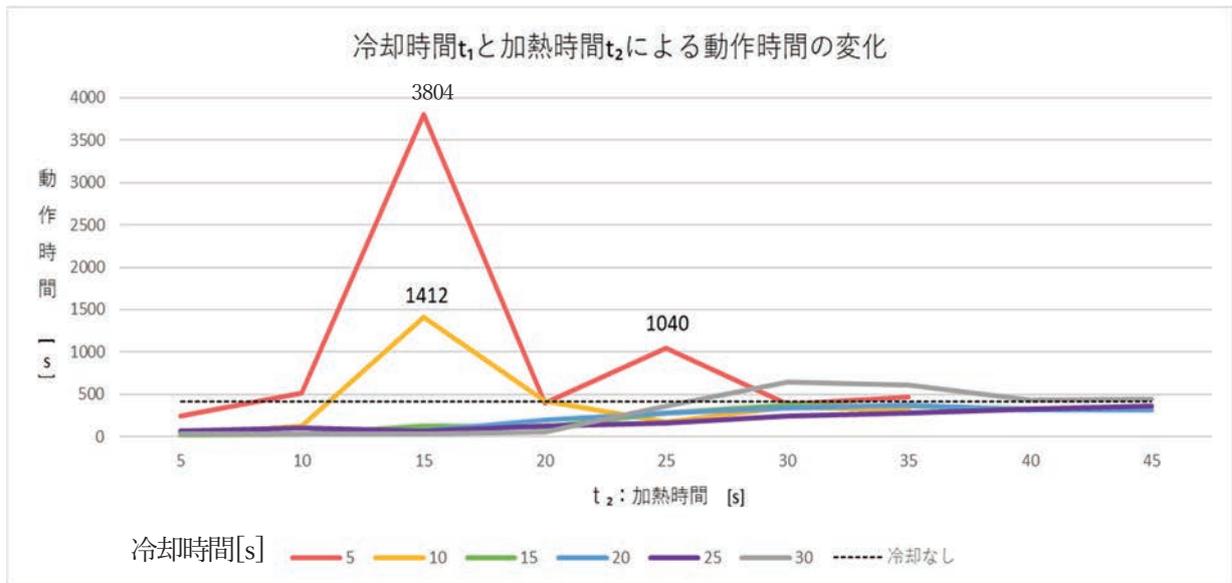
7. 結果2

表4 冷却時間 t_1 [s]と加熱時間 t_2 [s]と動作時間[s]の関係

冷却時間 t_1 [s] \ / \ 加熱時間 t_2 [s]	5	10	15	20	25	30
5	242	23	22	41	64	31
10	520	126	37	32	98	34
15	3804	1412	124	65	71	35
20	400	420	118	197	120	56
25	1040	176	282	277	166	366
30	390	346	368	333	240	640
35	468	314	365	378	282	612
40			330	317	325	436
45			312	317	358	445

※表について

■ は実験1において最も動いた412[s]未満のデータ, ■ は412[s]以上のデータを示す。



グラフ2 冷却時間 t_1 [s]と加熱時間 t_2 [s]による動作時間の変化

※グラフについて

グラフの線の色が冷却時間、横軸が加熱時間、縦軸が動作時間を示している。

全体的に加熱時間が冷却時間より長く冷却時間が 10[s]以下のとき実験 1 の 412[s]を上回る結果が出た。特に冷却時間が 5[s]加熱時間が 15[s]の時エンジンは 3804[s]動作した。

8. 考察2

【実験②】

試験管を加熱し続けている時の方が適度に冷却した時より長く動いたことから、試験管内部の空気が膨張しすぎることを防ぎ、安定して動作するには冷却することが必要であることが分かった。しかし、加熱時間が短すぎると動作に必要な熱量が不足するということが分かった。

9. 結論



図7 ディスプレーサピストン部

試験管の底から順に、①最も質量の大きい 4.20[g]のビー玉、②質量の小さい 1.60[g]のビー玉、③質量の小さい 1.60[g]のビー玉、④質量の大きい 2.60[g]のビー玉、⑤質量の小さい 1.60[g]のビー玉と配列したときに最も長く動作した。特に、図7の④に質量の大きいビー玉、⑤に軽いビー玉を置くことで動作時間は向上することが分かった。同じ質量比では全体がより軽いほうが動作時間は長くなった。

また、エンジンを加熱し続けるよりも、エンジンを適度に冷却することで動作時間は拡張に向上した。最適な加熱時間と冷却時間の関係を調べた。その結果、加熱時間 15[s]、冷却時間 5[s]のとき動作時間が 3804[s]と最も長く動作することが分かった。

ビー玉の直径を統一し、質量だけを変化させた時の動作時間や、内部のビー玉の配列と a の長さの関係については今後の課題としたい。

10. 参考文献

- 1) 北山 智沙子,渡会 兼也. ビー玉スターリングエンジンの動作時間とビー玉の個数の関係, 高校教育研究 (71), 49-55, 2020-03 金沢大学附属高等学校
https://www.gifunet.ed.jp/ssd/sien/gakuryokusougou_suisin/koutokugakkou/koutokuH23/04rikaH23/04kaiset.pdf
- 2) 岐阜県高等教育総合センター, ビー玉スターリングエンジン～エネルギーの相互変換有効利用～
https://www.gifunet.ed.jp/ssd/sien/gakuryokusougou_suisin/koutokugakkou/koutokuH23/04rikaH23/04kaiset.pdf
- 3) 愛知県総合教育センター, ビー玉スターリングエンジン
<https://apec.aichi-c.ed.jp/kyouka/rika/butsuri/2018/rikigaku/sterling/sterling.html>

11. 謝辞

担当の佐藤先生, 研究内容について多くのアドバイス, ご指導をしてくださった先生方に心から感謝申し上げます。