

熱エネルギーを用いたManson サイクルエンジンカーを作ろう！

東京電機大学大学院 未来科学研究科 ロボット・メカトロニクス学専攻

○小野 昌之, 住若 美氣, 外處 泰輔, 白石 大喜, 姫野 寛, 甲斐 亙

1 概要

近年, 化石燃料の枯渇化や二酸化炭素の排出による温暖化など, 環境問題が深刻になっている. そこで, 化石燃料などの有限な資源の代用として電気エネルギーや熱エネルギーを利用し, 環境に配慮した動力機関の発展に期待が高まっている. また, 熱エネルギーを動力源とした動力機関であるホット エアエンジンが有り 多くの研究がなされている. ホット エアエンジンの動力源である熱エネルギーの発生方法には, 太陽光や電熱線を用いた手法など様々なものがある.

以上の点において, ホット エアエンジンは環境や資源を考えた動力源となることが期待されている. ホット エアエンジンの代表例としてスターリングエンジンやマンソンサイクルエンジンがある. しかし, マンソンサイクルエンジンに関する資料は少なく, エネルギー効率に関して不明瞭な点が多いことから, マンソンサイクルエンジンを動力源として扱う場合は, エネルギー効率を解析する必要がある.

そこで, マンソンサイクルエンジンを動力源とする四輪車を製作し, 電気エネルギーを用いた走行実験を行うことにより電力とエンジンの発生するトルクの関係について解析する.

実験で用いる四輪車には, マンソンサイクルエンジンのシリンダ部分に電熱線を巻きつけており, 電熱線に電圧を加えることで熱を発生させ, その熱をエンジンの駆動エネルギーとしている. また, エンジンのトルクを四輪車のタイヤに伝達するためエンジンプーリとタイヤのプーリをゴムによって直結する.

実験では, 一定区間内における四輪車の走行時間と電熱線に加えた電圧および電流を計測し, その計測データからエンジンが発生させたトルクを求めた.

その結果, マンソンサイクルエンジンを搭載した四輪車を製作し, 走行させることができた. また実験データから, 電熱線における電力と熱の関係は, 約 1.50[A] の電流を流した際に 22.5[w] の電力を作り出し, 最大 300 °C の温度を発生させることを確認した. また, その際にマンソンサイクルエンジンが発生させたトルクは 0.0000045332[N・m] であることが確認できた.

2 はじめに

近年、エネルギー問題や環境問題により、クリーンな機関の需要が高まってきた。その中で外燃機関は、熱源を外部に取っていることで燃料の形態に制限が無いことや最適な条件で燃焼が行えることから、大気汚染の原因となる有害ガスの排出を抑えやすいなど多くの利点が存在する。典型的な外燃機関のひとつとしてスターリングエンジンが存在する。スターリングエンジンとは、シリンダ外部から加熱、冷却を行うことで内部の空気圧を変化させ、運動エネルギーを取得するエンジンである。このエンジンは理想的なカルノーサイクルを実現することができ、高い効率で熱エネルギーから運動エネルギーへ変換することが出来ることが知られている。しかし理論上の効率を出すことが実際の装置では難しく、燃焼熱の多くはガス以外の部分に流れて浪費されてしまい、理論効率に近づけるためには複雑な構造が必要であると同時に高温部と低温部の温度差の高さが要求される。そこで、加熱のみで動作を行うことが出来るマンソンサイクルエンジンに着目する。マンソンサイクルエンジンとは、外燃機関でありながら吸気排気を繰り返して動作するエンジンである。マンソンサイクルエンジンの歴史は1952年と比較的浅く、知名度は低いことから性能の検証はあまり行われていない。スターリングエンジンにおいて技術的問題であった機械構造の複雑さと気体用シール機構の困難さをマンソンサイクルエンジンで解消出来ることから我々は、次世代の原動機として発展していく可能性を秘めていると考え、本稿でこのシステムの調査を行い、報告する。

3 目的

本実験はニクロム線からの電熱を利用してマンソンサイクルエンジンを搭載した四輪車を走行させることを目的とする。また、エネルギー効率に着目することでマンソンサイクルエンジンの有効性を検討する。ガソリンエンジンにおいて燃料生成過程まで考慮した場合のエネルギー変換効率は10%程度であるのに対し、発電施設から使用端までの電気エネルギーのエネルギー効率は最大60%と高いことが知られている。伝熱はほぼ100%であることから、fuel-to-wheelの観点から言えば高いエネルギー効率での動作が実現できると考えられる。そこで本稿では、作成した実機の動作を解析することで外燃機関であるマンソンサイクルエンジンの特性を調査し、エネルギー効率を検証する。

4 マンソンサイクルエンジンについて

マンソンサイクルエンジンは外燃機関でありながら吸気・排気を繰り返す珍しいエンジンである。本節では、実機であるマンソンサイクルエンジンを用いて、その動作原理を説明する。ただし、図における青矢印、赤矢印はそれぞれ温かい空気と冷たい空気を表現する。シリンダ内の温度が上昇し、空気が膨張することで図1に示すようにピストンが押し出される。ピストンが押されると、図2のとおり吸排気口が開き、膨張した温かい空気がシリンダ外へ放出される。図3のときシリンダ内は真空に近い状態となり、大気圧でシリンダが引き戻される。引き戻され、吸排気口と重なったとき、図4に示すように冷たい空気がシリンダ内を満たす。

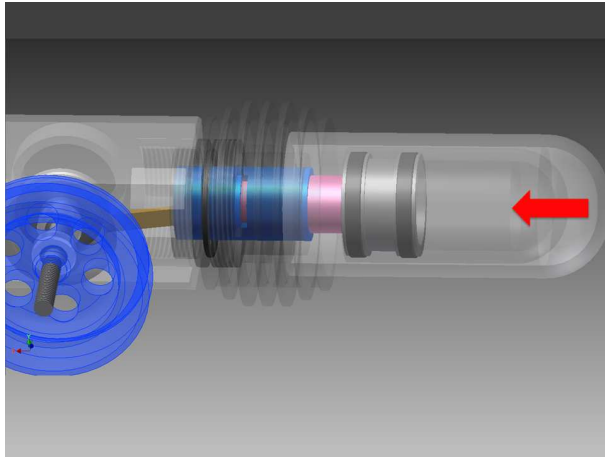


図 1: 空気膨張時 (クランクシャフト 180°)

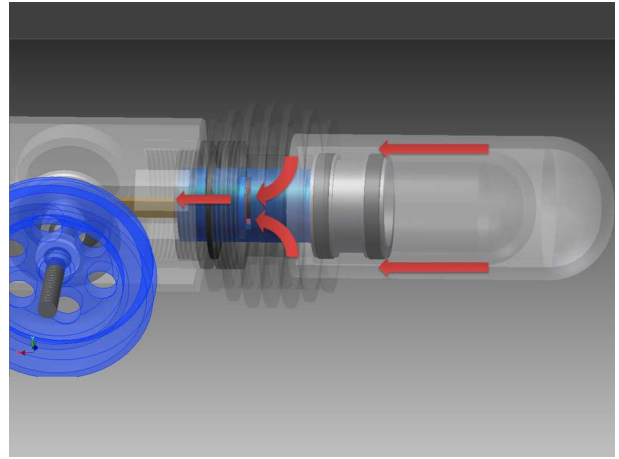


図 2: 排気時 (クランクシャフト 270°)

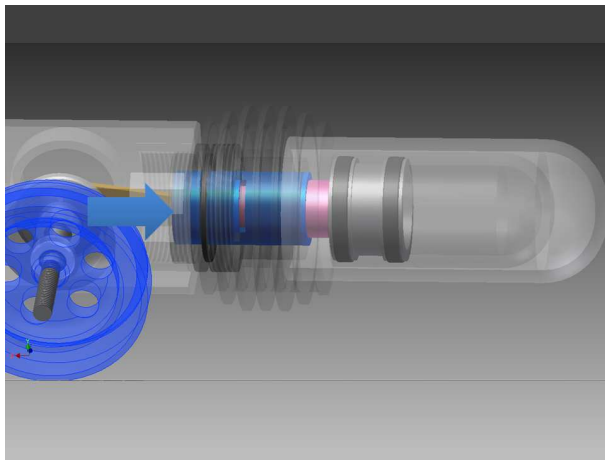


図 3: 真空に近い時 (クランクシャフト 0°)

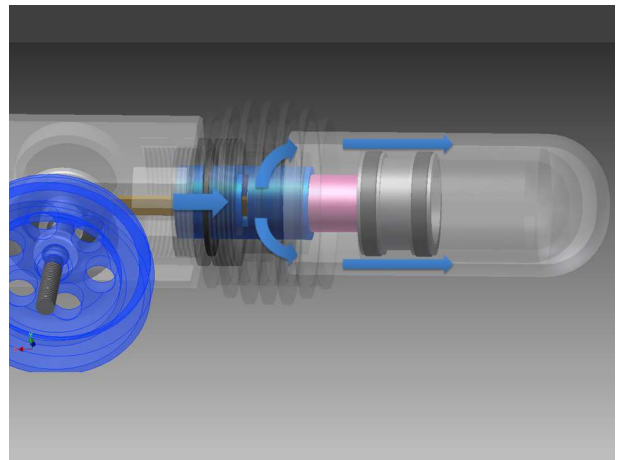


図 4: 吸気時 (クランクシャフト 90°)

4.1 マンソンサイクルエンジンにおける機械構造

図5にマンソンサイクルエンジンの構成を示す。

マンソンサイクルエンジンにおいては吸排気系が重要である。また、シリンダから本体への伝熱を抑制するため、放熱板を設ける必要がある。図6にマンソンサイクルエンジンの内部構造を示す。

黄色部はコンロッドを示し、光沢のある部分はガラスを示している。内側のピストンが熱膨張により移動すると、力はコンロッドに伝わり、クランクシャフトにより並進運動から回転運動へと変換される。また、内側のピストンが中間まで達すると、外側に備えられたガラスのスリッドと内側のピストンとガラスのスリッドが重なり、排気が行われる。吸気も同様の原理で行われる。

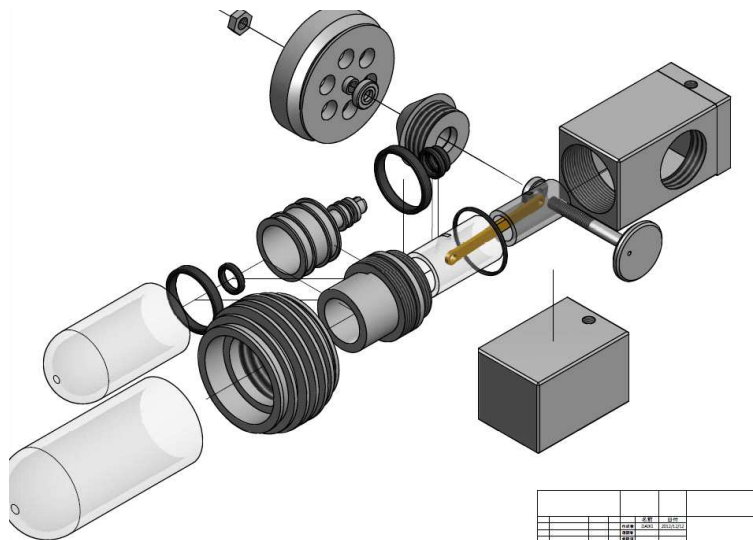


図 5: マンソンサイクルエンジンの構成

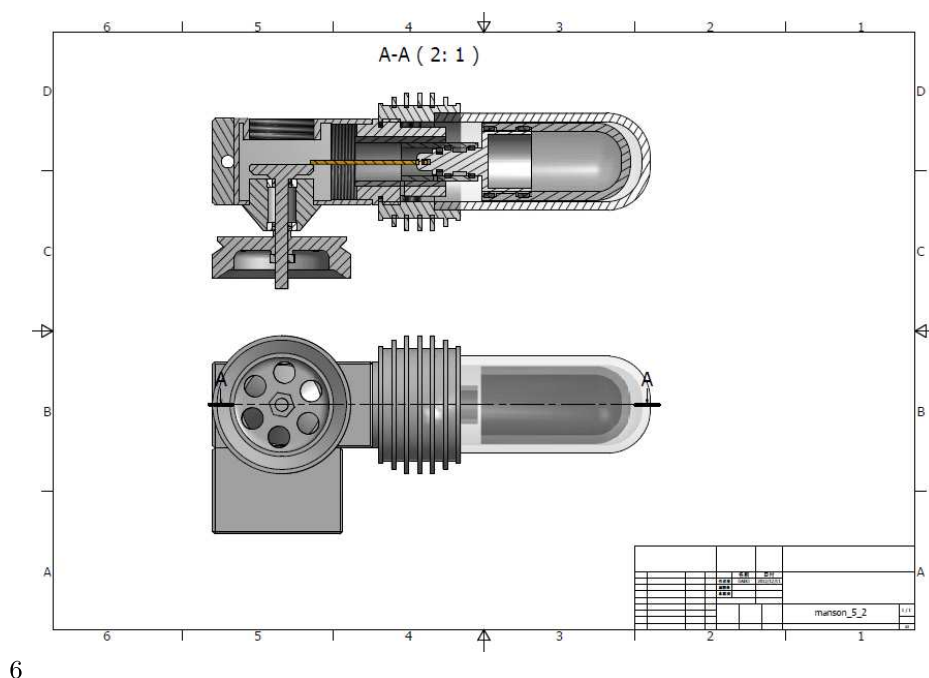


図 6: マンソンサイクルエンジンの内部構造

5 四輪車の駆動原理

本説では、前節で説明したマンソンサイクルエンジンを搭載するシャーシ部分について示す。タイヤと車体(アルミ板とエンジンを取り付けしたもの)をつなぐシャーシ部分は、タミヤのミニ四駆”MINI 4WD PRO SERIES NO. 20”を用いる。また、車体とシャーシ部分を図のように取り付ける。

図 7 に示した四輪車は電熱線を温めることによって以下の動作を行う。

1. 電熱線に電流を流し、電熱線を温める。
2. 電熱線の熱によってシリンダー内が暖められる。
3. シリンダー内の空気が膨張、圧縮することでエンジンが回る。

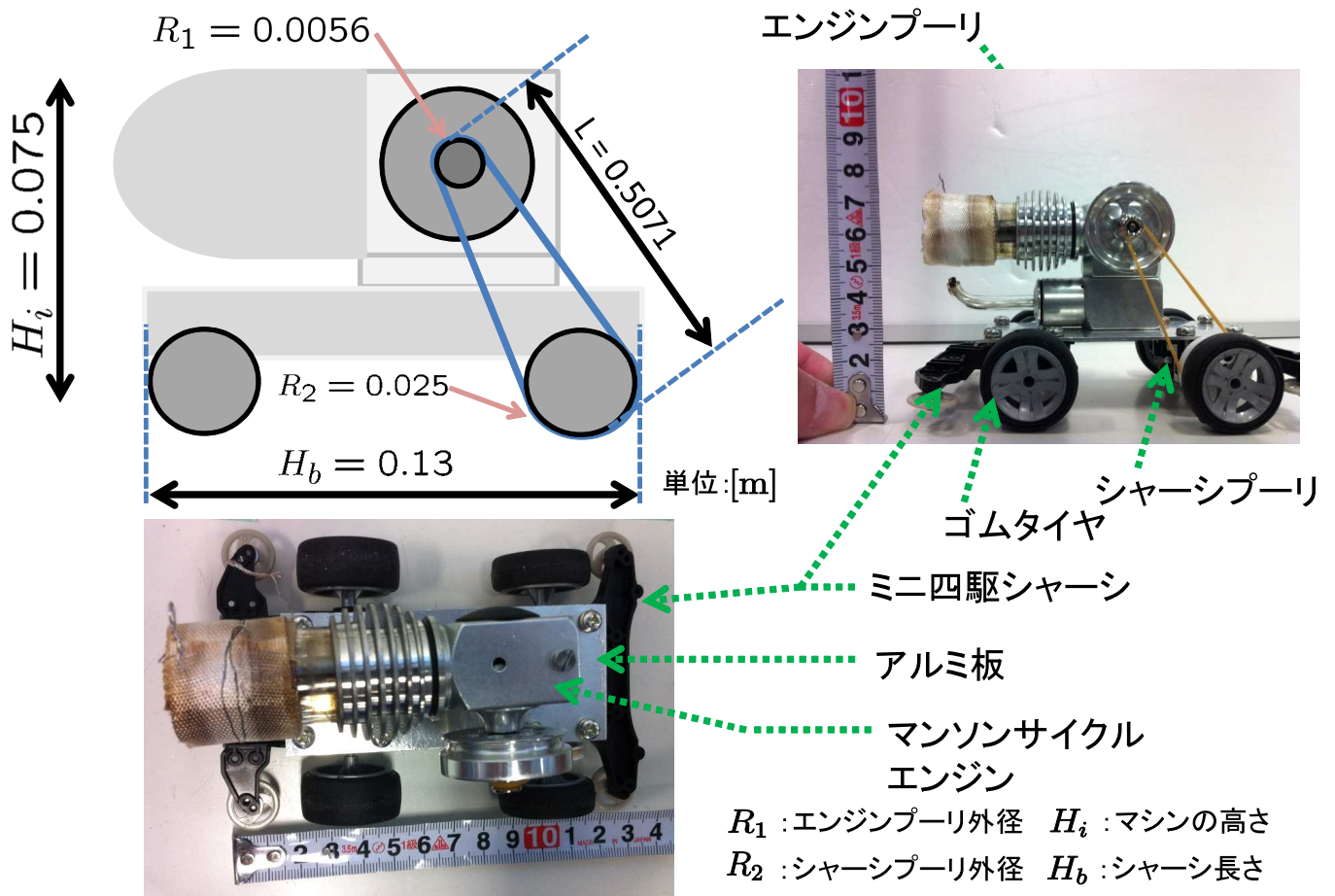


図 7: 製作した四輪車

4. エンジンプーリはゴムを通じてシャーシプーリに直結していることからシャーシプーリが回転する.
5. シャーシプーリの回転と同様にタイヤも回転する.
6. 車が前進する.

6 マンソンサイクルエンジンの始動実験

マンソンサイクルエンジンは外部から熱を与えることによって動力を得る, 外燃機関である. マンソンサイクルエンジンを使用した四輪車を製作するため, マンソンサイクルエンジンがどの程度の温度で始動するかを検証する必要がある. また, 熱源は何を使用するかを検討する.

6.1 マンソンサイクルエンジンの始動に必要な温度の調査

マンソンサイクルエンジンが, 運動エネルギーを得るためにはそれに応じた熱エネルギーが必要となる.

本稿では, マンソンサイクルエンジンを実際に動作させ, 与えた熱と発生したトルクの関係を知るために, マンソンサイクルエンジンがどの程度の熱を与えた時に動作するのかを調査する. また, 四輪車の動力として使用する場合には, エンジンから車輪への動力伝達の必要があり, 始動のみの場合よりも大きな熱が求められる可能性がある. マンソンサイクルエンジンが

始動する温度を調査するために、熱を与えるための熱源と、シリンダ部に加えられる熱の大きさを確認するための測定器を使用する。図8に始動に必要な熱の調査実験における機器配置の概略図を示す。

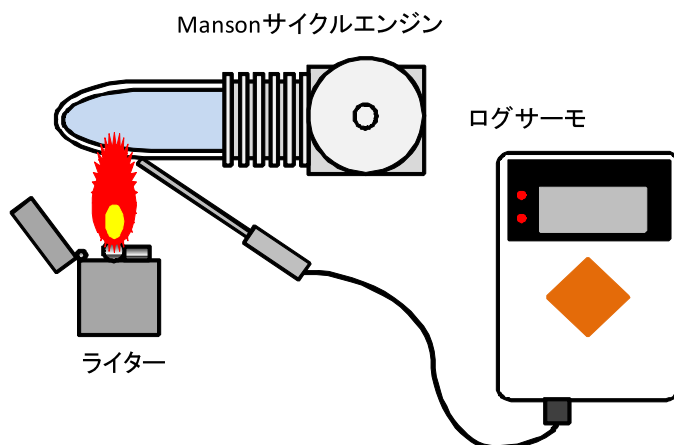


図 8: エンジン始動温度の調査実験・概略図

シリンダ部の加熱の熱源には、加熱における最も基礎的なものである火を使用し、温度変化の調査には 0°C ～ 750°C までの温度を測ることのできるログサーモを使用している。図8では、マンソンサイクルエンジンのシリンダ下部付近にライターを、シリンダ上部にログサーモの測定子を当てている。実験の結果として、シリンダ部が 170°C 以上の際にマンソンサイクルエンジンが始動し、四輪車の動力として使用するためには 200°C 以上の温度が必要であることが確認できた。

6.2 シリンダ部加熱の熱源の選定

エンジンの性能を調べるためには、こちらが与えるエネルギーと、発生するエネルギーを把握する必要がある。本実験では、外燃機関を動力とした四輪車を駆動させるため、与えるエネルギーは熱エネルギー、発生するエネルギーは運動エネルギーである。運動エネルギーについては、動作した際の移動距離や速度から計測し、計算すればよいため、与えるエネルギーの計測方法を考える。熱エネルギーを調整することができる熱源として、電流を流すことによって熱を発生する電熱線を使用する。電熱線は、線自体に直接電流を流すことによって熱を発生させることのできる金属線であり、発生する熱の量は流した電流の量と電熱線の抵抗の大きさによって変化する。電熱線の中でも、抵抗値が大きく、電流に対して発生する熱の大きいニクロム線を使用する。

6.3 ニクロム線の選定と発生する熱の理論値

使用するニクロム線は坂口電熱株式会社が提供している NTK シリーズの NTK No.1、電源には定電圧電源を使用する。四輪車を駆動させるための温度の調査実験より 200°C 以上の温度上昇が必要となる。ニクロム線の大きさは、マンソンサイクルエンジンのシリンダ部に巻きつけることを考慮し、電熱線同士が接触しないために太過ぎず、ある程度の抵抗値を確保するために細すぎないものを使用する。電熱線同士が接触した場合には、回路の短絡により発生する熱量が低下し、細すぎる場合には、抵抗値が低くなってしまう。今回はニクロム線の径は 0.35mm

を使用する．坂口電熱株式会社の提供する NTK No.1 の仕様書より，径 0.35mm，長さ 500mm の場合の電流，電圧に対する温度の理論値を表 1 に示す．

表 1: NTK No.1 の仕様書理論値

直径 [mm]	長さ [m]	線温度 [°C]	抵抗値 [Ω /m]	電流 [A]	電圧 [V]
0.35	0.50	200	11.2	1.26	7.00

表 1 より，200°C 以上の温度上昇を得る場合は，1.26A の電流を流す必要があることがわかる．また，ニクロム線に流す電流を大きくすれば大きくするほど，温度は上昇するため，電流を変更することで，与える熱を変化させることができる．

6.4 ニクロム線による加熱の方法

ニクロム線の線温度は 1.26A で 200°C 以上となるが，エンジンを動作させるにはこの熱をシリンダ部に伝える必要がある．図 9 にニクロム線によるマンソンサイクルエンジンの加熱の概略図を示す．

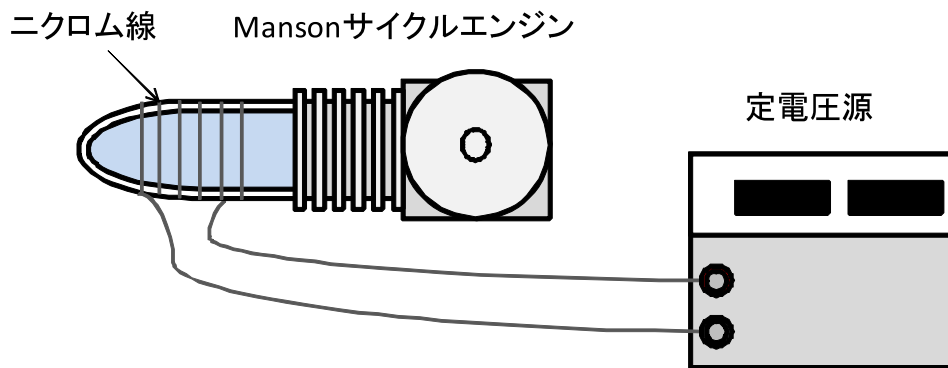


図 9: ニクロム線によるマンソンサイクルエンジンの加熱・概略図

本実験においては熱を伝える方法として，ニクロム線をシリンダ部に直接まきつけ，電流を流す．また，巻き方については，図 9 のようにニクロム線同士が接触しないように，均等に巻きつけていく．これにより回路の短絡を防ぎ，より効率よく熱を伝えることができる．

7 マンソンサイクルエンジンを用いた四輪車の走行実験

本節では，電熱で駆動するマンソンサイクルエンジン四輪車の走行実験を行い，性能の評価を行う．簡易型の四輪車を用いて，前後進における走行性能を考える．また，実験を通して外燃機関を用いたエンジンの実用性や汎用性を考える．

7.1 実験内容

マンソンサイクルエンジンは，外燃機関でありながら吸気と排気を繰り返してピストン運動を行うシステムである．マンソンサイクルエンジンにおけるピストン運動がシステムの動力を担う場合として図 10 のような四輪車走行システムを考える．本実験では電熱線をマンソンサイクルエンジンに巻き付け，定電圧電源より出力される電流を変化させることにより熱量を調

整する。また、実験では図 11 に示すような長さ 77cm のレーンを作製する。作製したレーン上をマンソンサイクルエンジンを搭載した四輪車を走行させ、走行時間を計測する。これにより、マンソンサイクルエンジンを用いた四輪車の電流に対する走行速度を導出する。また、エネルギー間の変換効率・損失を考えることでマンソンサイクルエンジンの実用性や汎用性を考察する。

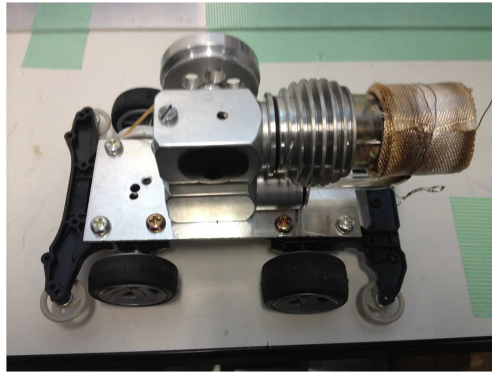


図 10: マンソンサイクルエンジンを搭載した四輪車

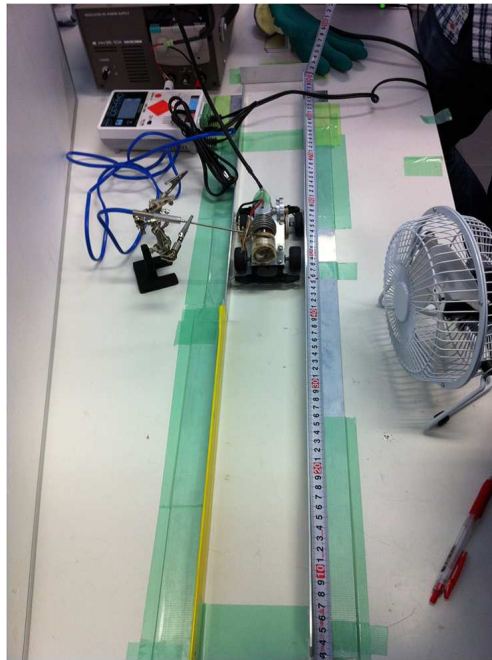


図 11: 実験環境

7.2 実験手順

実験手順を以下に示す。ただし、前節に記載されている四輪車、電熱線の詳細は省略する。

1. 電熱線を八周、マンソンサイクルエンジンのシリンダ部に巻きつける。
2. マンソンサイクルエンジンを四輪車に搭載する。図 12, 13, 14 にマンソンサイクルエンジンの縦横、高さの寸法を示す。また、マンソンサイクルエンジンのプーリと四輪車のプーリを輪ゴムを用いて直結する。
3. 図 15 に示すように四輪車を走行させる長さ 77cm のレーンを作製する。

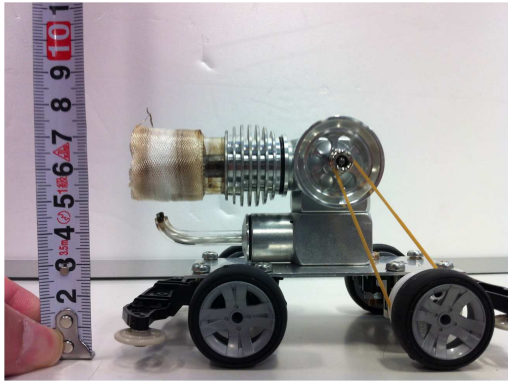


図 12: 四輪車: 高さ



図 13: 四輪車: 縦



図 14: 四輪車: 横

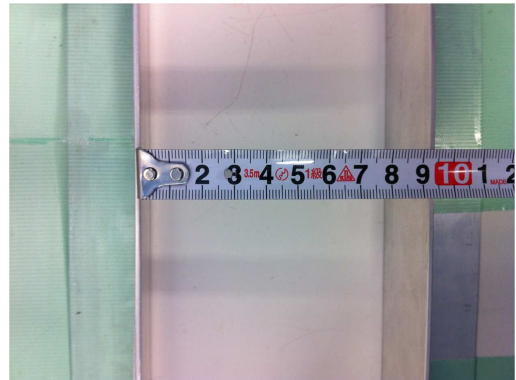


図 15: 走行レーン

4. 図 16 に示す定電圧電源と マンソンサイクルエンジンを搭載した四輪車を接続し、レーン内に配置する。また、接続ケーブルが走行に影響を与えないようにするため上方から糸でケーブルを吊り下げる。構成した実験環境を図 17 に示す。



図 16: 定電圧電源

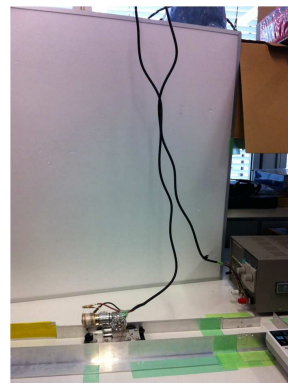


図 17: 構成した実験環境

5. 定電圧電源の電流値を 1.0A から 0.5A ずつ増加させ、3.0A まで変化させ、電流値変化後の走行時間を計測する。

7.3 実験結果

本実験では、77cmのコースを四輪車が走行する際の時間[s]と電圧[V]および電流[A]を計測した。また、計測したデータを元に四輪車の走行速度、車輪の回転トルクおよびエンジンが発生したトルク[N・m]を算出し、電流値との関係を確認した。表2に計測した四輪車の走行時間等のデータを、表3に計測したデータを元に算出した四輪車の走行速度や車輪およびエンジンのトルクを示す。また、図18～21に計測データのグラフを示す。

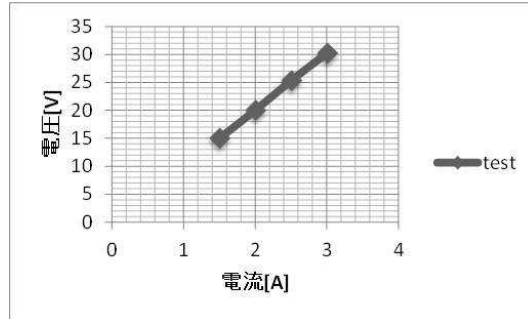


図 18: 流した電流と電圧の関係

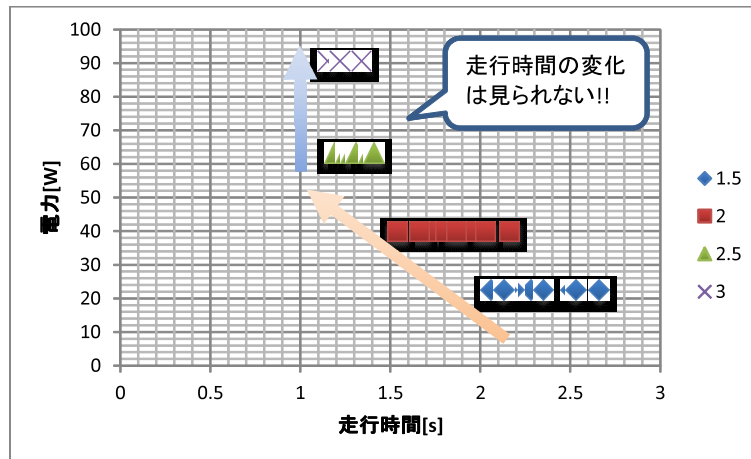


図 19: 電力とと走行速度の関係

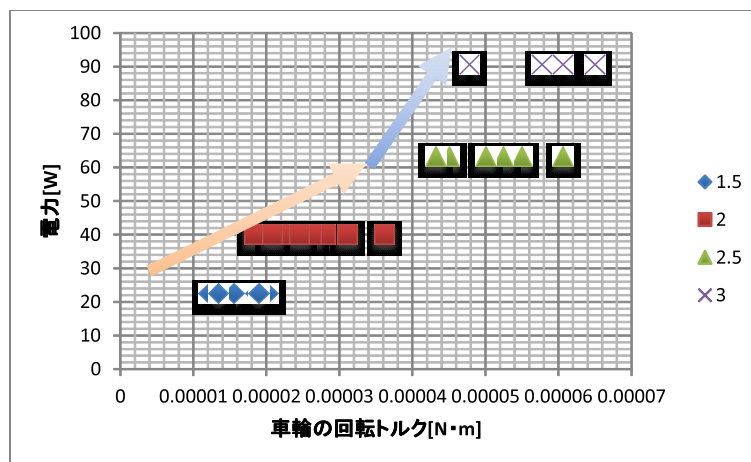


図 20: 電力と発生した車輪トルクの関係

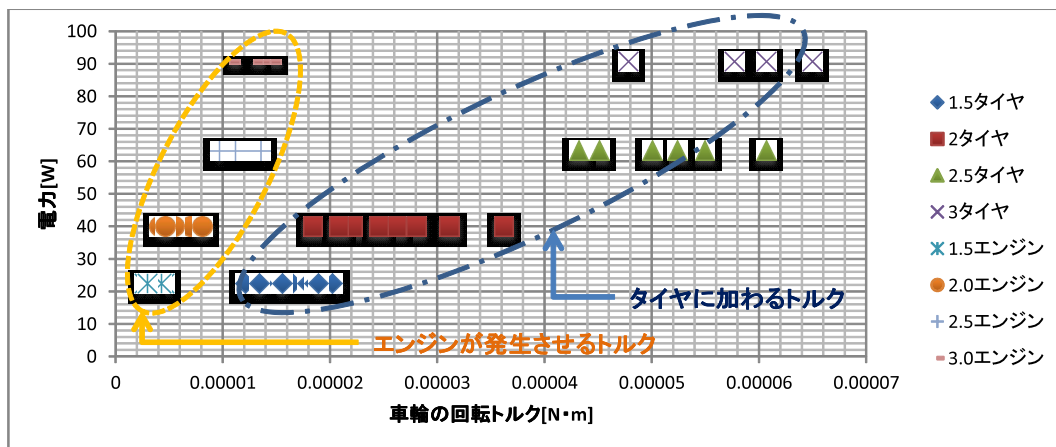


図 21: 車輪トルクとエンジントルクの比較

図 18 は電熱線に加えた電圧 E に対して流れた電流 I の関係を示している．結果より電圧 E [V] と電流 I [A] は比例関係であることが確認できた．またその関係式は最小二乗法により，

$$E = 10.18I - 0.28$$

と導出できた．つまり電圧 E は電流 I を 10.18 倍した値になることが本実験で確認できた．また，電力 W は電圧 E と電流 I との関係式，

$$W = E \times I$$

より求めることができる．図 19 から流れる電流が少ない場合，四輪車の走行速度は遅くなるということが確認できる．この現象は，ジュールの法則より証明できる．電熱線から発生する熱エネルギーを J [J] とすると， J および E, I 走行時間 t [s] との関係式は，

$$J = E \times I \times t$$

となり，電圧が大きくなると流れる電流も多くなり，発生する熱エネルギーも大きくなるのがわかる．これより，流す電流が多くなれば，その分エンジンの動力源である熱エネルギーは大きくなり四輪車の走行速度が早くなることが実験データおよび理論式より確認できた．しかし，その関係は約 2.5A までは比例関係であるが，それ以上の電流を流した場合，走行時間の変化はあまり見られないことから 2.5A が四輪車における電流の飽和値となっていることが確認できた．

次に，車輪に加わる回転トルクを導出する．車輪単体の慣性モーメント J_a [kg·m²] は四輪車の全質量を M [kg]，車輪の直径 (今回はシャーシプーリの直径) を D [m] とすると，

$$J_a = \frac{MD^2}{8}$$

で求めることができる．また，四輪車の全質量は 0.35 [kg]，シャーシプーリの直径は 0.025 [m] であることから車輪の慣性モーメント J_a は 0.00002734375 と求めることができた．次に，求めた J_a より車輪の回転トルク T_a [kg·f] を求める．トルクと慣性モーメント J_a および四輪車の速度 f [m/s] 走行時間 t [s] の関係式は重力加速度 g [m/s²] を 9.81 とすると，

$$T_a = \frac{J_a}{9.81} \times \frac{2\pi f}{t}$$

で求めることができる．また，エンジントルクを T_e [kg·f]，エンジンプーリの直径を R_1 [m]，シャーシプーリの直径 R_2 [m] とすると，エンジントルクは，

$$\begin{aligned} T_e &= T_a \frac{R_1}{R_2} \\ &= T_a \frac{0.0056}{0.025} \end{aligned}$$

と求めることができた．導出結果は表 3 にまとめる．図 20 では，電熱線に流す電流を多くすると車輪の回転トルクも比例して大きくなっていることが確認できる．また，走行時間の結果と同様に，2.5 [A] をさかいに，電流の増加に対して車輪の回転トルクの変化はほとんど見られないことが確認できた．

図 21 では，エンジントルクと車輪の回転トルクの比較を行なっている．図 21 からエンジントルクに対して車輪の回転トルクは大きくなることが確認できる．この結果より，エンジンプー

リに対してシャーシプーリを大きくすることで車輪の回転トルクを増幅できていることがわかる。また、トルクの増幅率 k はギア比の計算より、

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{R_1}{R_2} \\
 &= \frac{0.0056}{0.025} \\
 &= 0.224
 \end{aligned}$$

と求めることができた。またプーリの回転数とトルクを関 22 に示す。

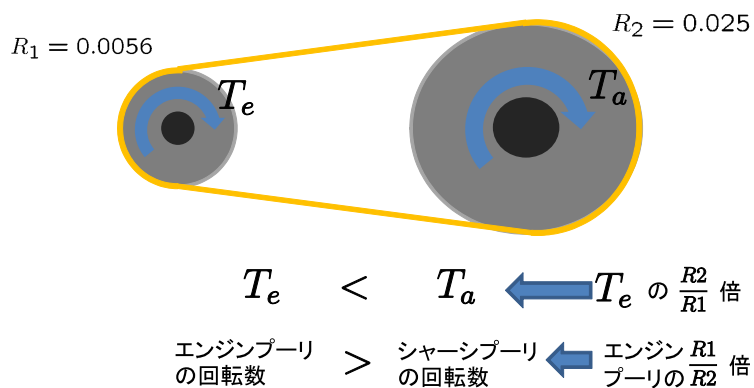


図 22: プーリの回転数とトルクの関係

表 2: 加えた電圧に対する 走行時間および電流値

電流 [A]	2	2	3	3
電圧 [V]	15	20	25	30
回数	時間 [s]	時間 [s]	時間 [s]	時間 [s]
1	2.060	1.870	1.190	1.220
2	2.500	1.750	1.310	1.340
3	2.280	1.810	1.250	1.220
4	2.060	1.970	1.310	1.220
5	2.190	1.660	1.410	1.220
6	2.660	1.540	1.250	1.340
7	2.150	2.030	1.280	1.220
8	2.350	2.160	1.310	1.190
9	2.130	1.870	1.380	1.150
10	2.530	2.030	1.410	1.220
平均	2.291	1.869	1.310	1.234

表 3: 流した電流に対する実験車の走行速度および車輪およびエンジンの回転トルク

1.5[A]			2.0[A]		
回転速度 [rad/s]	車輪トルク [N・m]	エンジントルク [N・m]	回転速度	車輪トルク	エンジントルク
2.3795981783	0.0000202374	0.0000045332	2.6213755333	0.0000245587	0.0000055011
1.9607888989	0.0000137407	0.0000030779	2.8011269984	0.0000280422	0.0000062815
2.1499878277	0.0000165203	0.0000037006	2.7082719598	0.0000262139	0.0000058719
2.3795981783	0.0000202374	0.0000045332	2.4883107854	0.0000221287	0.0000049568
2.2383434919	0.0000179061	0.0000040110	2.9529953297	0.0000311653	0.0000069810
1.8428467095	0.0000121374	0.0000027188	3.1830988618	0.0000362115	0.0000081114
2.2799870917	0.0000185785	0.0000041616	2.4147646538	0.0000208399	0.0000046681
2.0859456371	0.0000155508	0.0000034834	2.2694315959	0.0000184069	0.0000041231
2.3013954212	0.0000189291	0.0000042401	2.6213755333	0.0000245587	0.0000055011
1.9375384376	0.0000134167	0.0000030054	2.4147646538	0.0000208399	0.0000046681

2.5[A]			3[A]		
回転速度 [rad/s]	車輪トルク [N・m]	エンジントルク [N・m]	回転速度	車輪トルク	エンジントルク
4.1193044094	0.0000606449	0.0000135845	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246
3.7419635475	0.0000500433	0.0000112097	3.6581882442	0.0000478276	0.0000107134
3.9215777978	0.0000549627	0.0000123116	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246
3.7419635475	0.0000500433	0.0000112097	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246
3.4765760619	0.0000431966	0.0000096760	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246
3.9215777978	0.0000549627	0.0000123116	3.6581882442	0.0000478276	0.0000107134
3.8296658181	0.0000524165	0.0000117413	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246
3.7419635475	0.0000500433	0.0000112097	4.1193044094	0.0000606449	0.0000135845
3.5521538023	0.0000450952	0.0000101013	4.2625845628	0.0000649370	0.0000145459
3.4765760619	0.0000431966	0.0000096760	4.0180100387	0.0000576990	0.0000129246

8 結論

本実験では、マンソンサイクルエンジンを用いた四輪車を作成し、走行実験を行うことでエンジンの動力源である電気エネルギーとエンジンが発生するトルクの関係について示した。

エンジンの動力源は定電圧電源から供給される電圧であり、電熱線に電流を流すことで熱を発生させ、その熱を用いてエンジンを駆動させた。

また、その際の車輪の回転数から車輪のトルクを求め、エンジンのトルクを算出した。

その結果から、約 1.5[A] の電流を流すことで最大 300 °C の温度を発生させることができ、マンソンサイクルエンジンは 0.0000045332[N・m] のトルクを発生させていることが確認できた。しかし、電熱線の巻き方や車両の軽量化など実機の構造を、改善することでより少ない電力でエンジンを駆動することができると思う。

本稿では、化石燃料を使うことなく、クリーンなエネルギーで動作するマンソンサイクルエンジンを使い四輪車を走行させることができた。

また、電気エネルギーを熱エネルギーに変換し、熱エネルギーをエンジンの動力に変換することで四輪車を動作させることができること示し、かつ、各エネルギー変換の関係式を導出することができた。

9 参考文献

参考文献

- [1] 清水 明. 熱力学の基礎., 東京大学出版会 (2007 年).
- [2] 小峯 龍男. 機構学の「しくみ」と「基本」., 技術評論社 (2009 年).

10 謝辞

本実験は株式会社八光電機製作所熱の実験コンテストにおいて助成を賜りました。また、このような貴重な場を設けていただき、ここに深甚なる謝意を表します。また、本実験を行うにあたり、多大なご助力を与えて下さった本学の先生方、研究室員に対し深く感謝を申し上げます。