

マンソンサイクルエンジンを用いた三輪車を作ろう

東京電機大学大学院 未来科学部 ロボットメカトロニクス学科
賀来，姫野，小野，相馬，浪川，外處，白石

はじめに

現在，化学燃料などの有限なエネルギーの代用として，太陽光や，熱，風力などの自然エネルギーを用いることに期待が高まっている．そこで，私たちは太陽熱を利用したホットエアエンジンの実現を目指す．

ホットエアエンジンは，スターリングエンジンが代表的であるが，エンジンの機構に加熱部と冷却部が必要であり，太陽熱だけで動作させることを考えると複雑な機構になると考えられる．そこで，排熱，吸気を利用して動作を実現する Manson サイクルエンジンを用いることを考える．Manson サイクルエンジンを製作し太陽熱で動作させ，三輪車の走行を実現する．

本実験で太陽光を用いた Manson サイクルエンジンを使い，三輪車を走行させることを確認することで，太陽光などの再生可能なエネルギーのさらなる有効性を示すことができると考える．

本稿では，モデルベース開発の観点から，マンソンサイクルエンジンのモデリングをまず行い，入力(今回はシリンダーに加わる熱量)に対しどのような出力(今回はホイールの回転角度)がでるのかを，数値シミュレーションプログラムを作成することで確認する．

また，いくつかのパターンでエンジンのパラメータ(質量・長さなど)を変化させシミュレーションすることで各パラメータが出力にどのように影響してくるのかを考察する．

Manson サイクルエンジンの原理

マンソンサイクルエンジンは図 1 のような機構である．

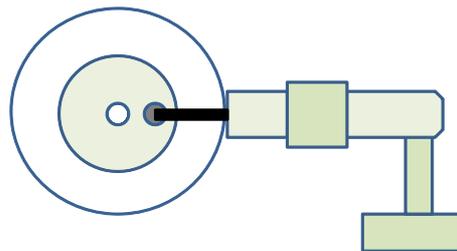


図 1: Manson サイクルエンジン

図 4 においてシリンダー内を太陽光または火で温めると，空気が膨張しピストンを押し出すような力が働く．ピストンが押されきるとピストンの中央から膨張した空気がシリンダーの外へ放出される．このとき(図 3 の状態)シリンダー内の熱せられた空気が一気にシリンダーの外へ飛び出し，シリンダー内は真空に近い状態となる．シリンダーが真空になると，押されきったピストンが元の位置に引き戻されるように力が働く．ピストンが引き戻されきったら吸気されシリンダー内は冷たい空気で満たされる．

上記の動作を繰り返すことでピストン運動を繰り返す機構が Manson サイクルエンジンである．

本実験では，Manson サイクルエンジンを動力源とした三輪車の模型を作成し，太陽光，熱エネルギーから機械エネルギーへ変換することで三輪車の走行を実現させる．



図 2: シリンダーを暖めた状態



図 3: 膨張した空気によってピストンが押し寄せられた状態



図 4: シリンダー内が真空な状態



図 5: ピストンが引き戻されきった状態

1 マンソンサイクルエンジンの行程と温度変化の入力

マンソンサイクルエンジンにおける，ピストンにかかる力を，温度変化させた時の行程毎に考える．図 6 にマンソンサイクルエンジンのホイールの回転角度が $0^\circ \sim 180^\circ$ までの場合のピストンが移動する概略図を示す．

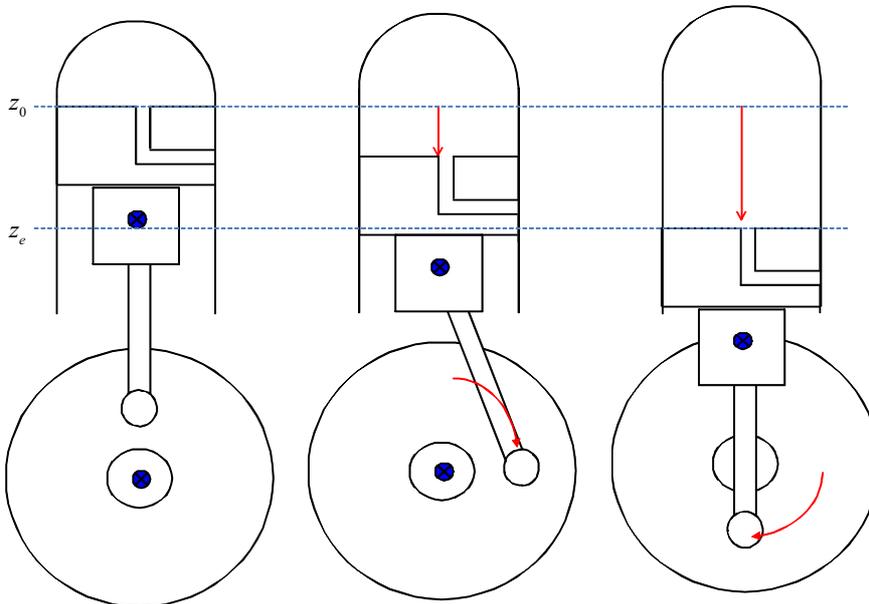


図 6: ホイール回転角度とピストン位置の関係

図 6 の左側に示すように，ピストンがシリンダの最も奥にある場合を，ピストンの初期位置 z_0 とする．マンソンサイクルエンジンにおいては，シリンダ内部の気体に熱を加え，温度変化に伴う内部エネルギーの増加と，外部への仕事を利用することで，ピストンを動かす．ボイルシャルルの法則

$$PV = T \quad (P: \text{気体の圧力}, V: \text{気体の体積}, T: \text{気体の温度}) \quad (1)$$

より，シリンダ内部の気体の温度を上昇させた時には，シリンダ内部の気体の圧力，体積が上昇する．マンソンサイクルエンジンでは，ピストンが動くことにより，外部への仕事が行われるため，等圧変化となる．よって，図 6 における，ピストン初期位置 z_0 から，ホイールが半回転した場合のピストンの終端位置 z_e の間，ピストンにかかる圧力は一定である．よって，ホイールの回転角度が $0^\circ \sim 180^\circ$ までの間にピストンにかかる圧力は理想的な気体の圧力である

101325Pa とする．シリンダの面積に変化はないため，かかる力 F_1 は，

$$F_1 = PA \quad (2)$$

$$F_1 = 101325A[N](A : \text{シリンダの断面積}) \quad (3)$$

となる．ピストンが $z_0 \sim z_e$ まで移動するまでの間は，一定の力 F_1 がかかるということになる．

図7にホイールの回転角度が 180° から元の位置に戻るまでのホイールの回転角度とピストンの位置の関係を示す．

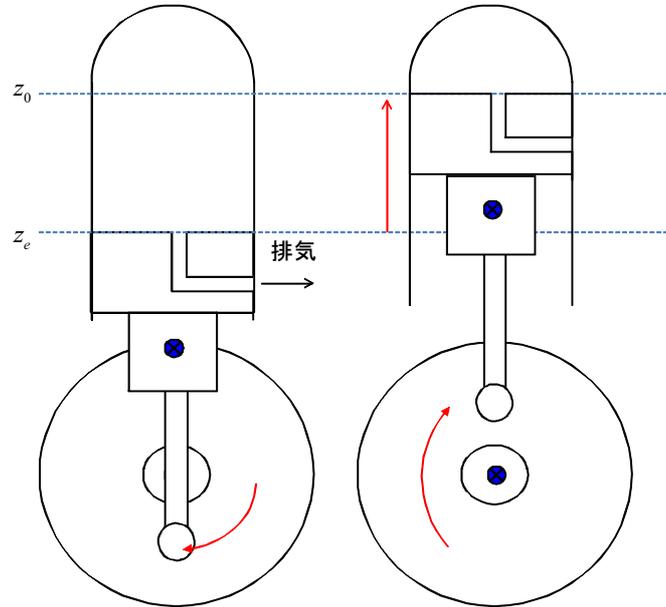


図7: ホイール回転角度とピストン位置の関係

ピストンが終端位置に達した場合，ピストンとシリンダに開けられた穴がかみ合い，排気が行われる．ピストンの移動がシリンダにより制限され，排気口から排気が行われることにより，温度変化に応じた体積変化は停止し，内部エネルギーが放出されることで，一度擬似的な真空状態となる．終端位置まで達したピストンは，シリンダ外部の気体の圧力によって初期位置まで戻されるため，シリンダ外部の気圧を 101325Pa ，下方向を正としたとき，ピストンが受ける力 F は，

$$F_2 = -101325A[N] \quad (4)$$

となる．

上記二つの行程が繰り返されるため，ピストンが受ける力は，

$$F = \begin{cases} 101325A[N] & 0^\circ < \theta < 180^\circ \\ -101325A[N] & 180^\circ < \theta < 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

となる．

必要となる温度の変化量 ΔT に関して，変化前の温度を T_0 ，変化後の温度を T_e ，気体の初期体積を V_0 ，変化後の体積を V_e と置いたとき，ボイルシャルルの法則より，

$$\frac{T_0}{V_0} = \frac{T_e}{V_e} \quad (6)$$

となる．ここで，求めたいのは初期温度からの温度の変化量であるため，

$$T_e - T_0 = \frac{T_0 V_e}{V_0} - T_0 \quad (7)$$

$$\Delta T = \frac{T_0 V_e}{V_0} - T_0 \quad (8)$$

となる．初期温度 T_0 は計測する事ができ，気体の体積 V_0, V_e に関してはエンジンを作成した時の物理パラメータによって決定されるので，マンソンサイクルエンジンを動かすのに必要な温度変化量 ΔT を求めることができる．

Manson サイクルエンジンを使った三輪車の作成

実験 (1) で製作した Manson サイクルエンジンを用いて，走行を実現する三輪車を製作する (図 8~9 参照)．またこのとき，三輪車はできるだけ軽くなるように材料の選定を行う．

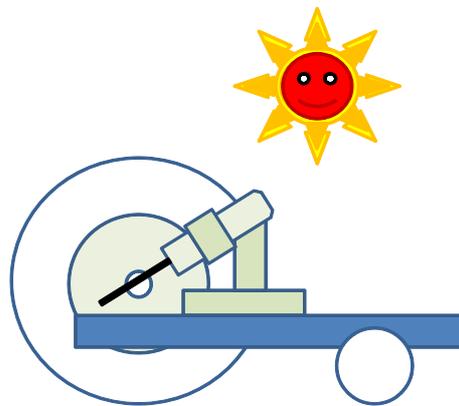


図 8: 横から見た三輪車

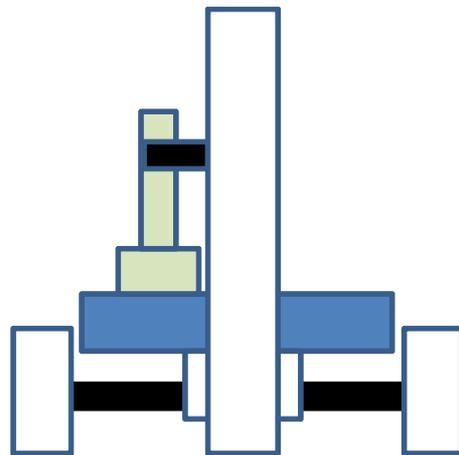


図 9: 前から見た三輪車

本実験の流れ

・本稿の内容

1. マンソンサイクルエンジンのモデリング
2. シミュレーションプログラムの作成
3. シミュレーション結果からエンジンの仕様を決定
 - ・今後の予定
4. 決定した仕様より，各パーツを見積もる
5. パーツの加工
6. エンジンおよび実機の組み立て
7. 実機完成

太陽光を集める手法の提案

太陽光を用いたエンジンに，太陽の熱エネルギーを直接，動力および電気にできるスターリングエンジンがあり，米国ではアリゾナで大規模な太陽熱によるスターリングエンジン発電の実験が行われている．(図 10 を参照) これからも，再生可能エネルギーである太陽エネルギーを



図 10: スターリングエンジンを用いた実験

<http://www.srpnet.com/environment/solar/maricopasolar.aspx> を参照

用いたシステム利用が注目を集めている．

しかし，車の駆動用等にエンジンを扱う場合，図 10 のように大規模な反射板を設置することは難しい．そこで，図 11 小規模の反射板を作成し，太陽光を集める装置を作成する．

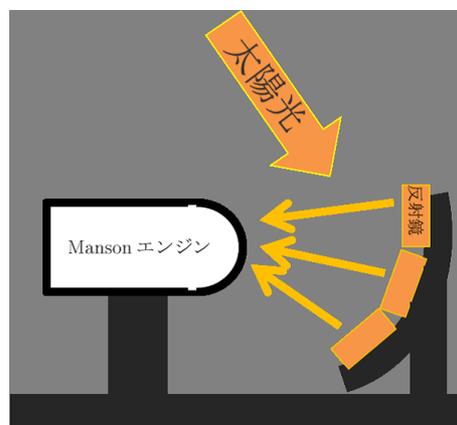


図 11: スターリングエンジンを用いた実験

2 ピストンクランク機構のモデリング

2.1 実験内容

マンソンサイクルエンジンの設計を行うに当たり，モデルベース開発の観点から，まずマンソンサイクルエンジンの数学的モデルを構築しPCを用いてシミュレーション解析することでエンジンの仕様を決定することを考える．

つまり，ここでは数学的にエンジンの挙動をモデリングし入力オーダー（消費エネルギーはできるだけ低減させたい等）や材料のパラメータ（質量，形状）等から，入出力データの傾向をみてエンジンの設計を行う．以下に本実験で用いた具体的なエンジン部分のモデリング手順を示す．

2.2 ピストンクランクのモデリング

図14にピストンクランクのモデル図を示す．2にピストンクランクモデルのパラメータを示す．ここで変数 $P[\text{Pa}]$ は圧力値を表し， $F[\text{N}]$ をシリンダー内圧力による力を示す．

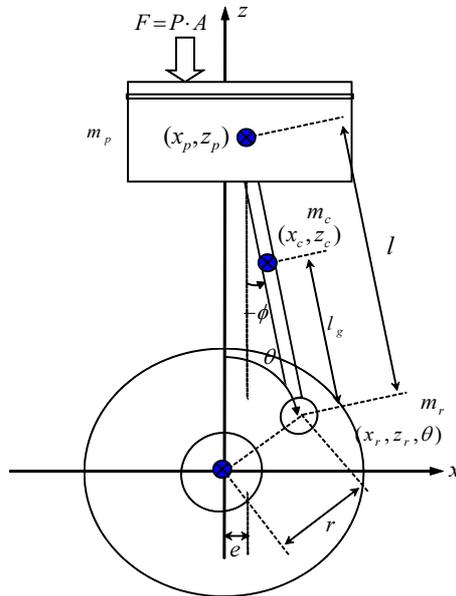


図 12: エンジンのモデル図

$$\begin{aligned}
 D^T M D &= m_p \left(r \sin \theta + \frac{r \cos \theta (r \sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \cos \theta - e)^2}} \right)^2 \\
 &+ m_c \left(\frac{l_c - l_g}{l_c} r^2 \cos^2 \theta \right) \\
 &+ m_c \left(r \sin \theta + \frac{l_g}{l_c} \frac{r \cos \theta (r \sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right)^2 \\
 &+ m_r r_g^2 \\
 &+ J_c \left(\frac{r \cos \theta}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right)^2 \\
 &+ J_r
 \end{aligned} \tag{9}$$

表 1: エンジンモデルのパラメータ一覧

変数	パラメータ名	単位
l	コンロッド長	[m]
l_g	コンロッドの重心と間接位置の距離	[m]
r	クランク長	[m]
r_g	クランクの重心と間接位置の距離	[m]
e	オフセット	[m]
m_p	ピストンの質量	[kg]
m_c	コンロッドの質量	[kg]
m_r	クランクの質量	[kg]
A	ピストンの上面の面積	[m ²]
c_p	ピストンの粘性係数	[Pa · s]
c_r	クランクの粘性係数	[Pa · s]
g	重力加速度	[m/s ²]
J_r	クランクの慣性モーメント	[g · m ²]
J_c	コンロッドの慣性モーメント	[g · m ²]

$$\begin{aligned}
 D^T h = & \left(r \sin \theta + \frac{r \cos \theta (\sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right) (m_p g - PA - c_p \dot{z}_p) \\
 & + m_c g \left(r \sin \theta + \frac{l_g}{l_c} \frac{r \cos \theta (r \sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right) \\
 & + m_r g r_g \sin \theta - c_r \dot{\theta}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 D^T M \dot{D} = & \frac{J_c \cos \theta}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \left(\frac{r^2 \cos^2 \theta (r \sin \theta - e)}{l_c^2 - (r \cos \theta - e)^2} - \frac{r \sin \theta}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right) \dot{\theta} \\
 & - \left(m_c r^2 \left(\frac{l_c - l_g}{l_c} \right) \cos \theta \sin \theta \right) \dot{\theta} \\
 & - m_c \left(\frac{l_g (r^2 \cos^2 \theta - r \sin \theta (r \sin \theta - e))}{l_c \sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} + r \cos \theta + \frac{l_g r^2 \cos^2 \theta (r \sin \theta - e)^2}{l_c (l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \\
 & \left(r \sin \theta + \frac{l_g \cos \theta (r \sin \theta - e)}{l_c \sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right) \dot{\theta} \\
 & - m_p \left(\frac{r \cos^2 \theta - r \sin \theta (\sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} + r \cos \theta + \frac{r^2 \cos^2 \theta (\sin \theta - e) (r \sin \theta - e)}{(l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \\
 & \left(r \sin \theta - \frac{r \cos \theta (\sin \theta - e)}{\sqrt{l_c^2 - (r \sin \theta - e)^2}} \right) \dot{\theta}
 \end{aligned} \tag{11}$$

また, ピストンに加わる力 F はシリンダーに加わる熱量から計算により導出することができる.

2.3 実験結果

クランクの回転角 θ を状態としたマンソンサイクルエンジンの数学モデルを導出することが出来た. 導出した数学モデルをシミュレーションより確認を行う. パラメータを以下の通りに設定した.

表 2: エンジンモデルのパラメータ一覧

変数	パラメータ名	数値
l	コンロッド長	0.1[m]
l_g	コンロッドの重心と間接位置の距離	0.03[m]
r	クランク長	0.025[m]
r_g	クランクの重心と間接位置の距離	0.0[m]
e	オフセット	0.01[m]
m_p	ピストンの質量	0.3[kg]
m_c	コンロッドの質量	0.08[kg]
m_r	クランクの質量	0.16[kg]
A	ピストンの上面の面積	4.0[mm ²]
c_p	ピストンの粘性係数	0.0001[Pa · s]
c_r	クランクの粘性係数	0.0012[Pa · s]
g	重力加速度	9.81[m/s ²]
J_r	クランクの慣性モーメント	8.76×10^{-5} [g · m ²]
J_c	コンロッドの慣性モーメント	3.86×10^{-6} [g · m ²]

今回, ピストンに加わる力 F は以下のとおり定義する.

- ・ ピストンが引き戻された場合

$$F = -0.1013[N/mm^2] \quad (12)$$

- ・ 空気が膨張している場合

$$F = 0.1013[N/mm^2] \quad (13)$$

膨張した空気が排気され, シリンダ内が真空になったと仮定したとき, 外気圧によってピストンが押し返される. 外気圧を 1013[hPa] としたとき, ピストン面積 1[mm²] にかかる力は, 式 (4) のとおりとなる. また, 空気が熱せられている間に発生する力は, 機体を駆動させるために必要なトルクによって設計される. 今回は機体が完成しなかったため便宜上, 式 (5) のとおり定義している. 式 (4)-(5) のおりにピストンに力が働いた際, 時間経過ごとにクランクの回転角度, 角速度がどのように変化したか図 (11)-(14) に示す.

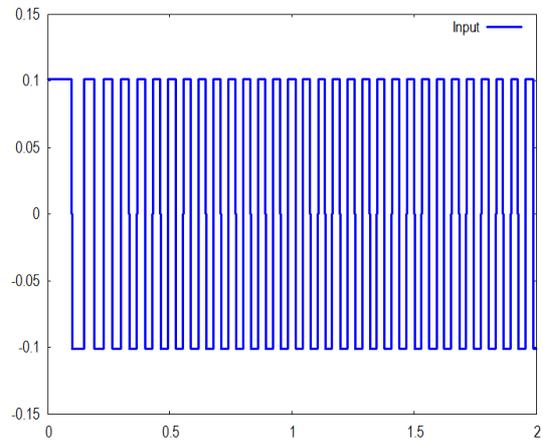


図 13: ピストン入力

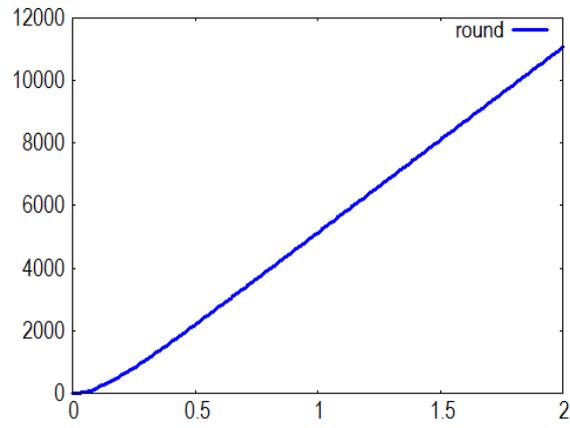


図 14: クランク回転角

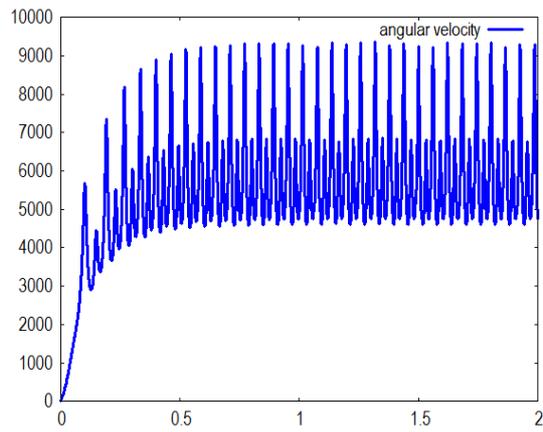


図 15: クランク回転角速度

図 11 は矩形波の形状をしている。この形状からマンソンエンジンのエンジンサイクルを読み取ることが出来る。 F が $0.1[\text{N}/\text{mm}^2]$ 付近はシリンダ内の空気が熱せられているときを表すし、 F が $-0.1[\text{N}/\text{mm}^2]$ まで低下しているときは熱せられた空気が排気されているときを表す。また、 F が $-0.1[\text{N}/\text{mm}^2]$ 付近を維持しているときは外気圧によりシリンダが押し戻されており、 $0.1[\text{N}/\text{mm}^2]$ 付近まで上昇しているときは吸気がなされているときを表す。このピストン入力を加えた場合、図 12,13 から分かる通り、クランク角度は上昇しており、この数学モデルがエンジンモデルとして再現できていることがわかる。

3 実機の作成から検証

3.1 行ったこと

マンソンサイクルエンジンのシミュレーションによる動作の検証までを行うことができた。

3.2 行えていないこと

動力源となるマンソンサイクルエンジンの加工が行えなかった。マンソンサイクルエンジンの加工を行う際、精度が求められる部分の加工は、大学の加工機械では、精度が足りなく加工できず、また企業に外注をする場合も費用内での加工を行うことができないので、加工を行うことができなかった。

解決案として、精度を必要とする部分と必要としない部分に分け、精度を必要とする部分の加工は外注し、その他の部分の加工を自分たちで行うものとする。

次に、マンソンサイクルエンジンによる検証を行うために、マンソンサイクルエンジンを搭載して走行することができる三輪車の製作を行う。三輪車の動力源としてマンソンサイクルエンジンを用い、実験環境を変化させた場合のマンソンサイクルエンジンの動力による三輪車の挙動を観察し、より効率の良い動作手法の検証を行う。

そのために、三輪車のモデルからモデリングを行い、三輪車のシミュレーションまでを行う。また、三輪車のモデルから図面を作成し、その図面に伴い加工を行い、三輪車のモデルを製作し組み立て実機を完成させる。

実際に製作した実機とシミュレーションとを比較し、適合していることの確認を行う。また違う場合には、整合性がとれるのか検証を行う。

製作を行う三輪車をより効率よく動作させるための入力を実験により検証し導き、入力として与えることでよりよく動作させることが可能となると考える。マンソンサイクルエンジンが効率よく動作するために与える入力を導くために与える入力を変化させ、その時の出力から解析し、効率の良い入力を決定する。

三輪車に搭載するマンソンサイクルエンジンは、シリンダー先端部分を熱し空気が膨張しピストンを押し動作を行う機構であり、入力とし熱源が入る。入力する熱源として、自然エネルギーである太陽光をレンズ等により集光し、シリンダーを熱する方法、またはアルコールランプ、ガスバーナー、ドライヤー、ろうそく等で熱する方法に熱を加える。ただし、これらの放出する温度は、それぞれ違うので今回の実験に適切な温度を放出できるものを入力の熱源として用いる。

また、マンソンサイクルエンジンを搭載した三輪車を用いて解析を行うので、出力は三輪車から読み取れるものとなる。主に速度、加速度、トルク、回転数、三輪車の物理パラメータ等である。

マンソンサイクルエンジンを搭載した三輪車の検証を行う際の実験環境の構築を行う必要がある。三輪車を走行させる環境として、常温の環境下で走行させその時の出力の検証を行う。ま

たは、三輪車を走行させる場所の温度を任意に一定にできる装置(恒温器, 恒温槽)を用いて行う。温度を変更していくことで外気温度に対してのマンソンサイクルエンジンと三輪車の特性の解析を行うことができる。

三輪車の特性の解析の一つとして速度を測定する。ある程度三輪車が走行できる距離を確保し、安定した速度が出た際の速度を測定する。三輪車の速度を測定する方法として速度センサーにより、三輪車の速度を測定する。また、トルクの測定としてトルクセンサーを用い、回転数の測定としては、走行距離に対し、タイヤの円周により測定もしくは、反射型のフォトセンサにより測定を行う。走行した時のタイヤの回転数を測定する方法として走行距離を検出し、タイヤの円周を当てはめて計算する手法とタイヤのシャフトに印をつけ反射型のフォトインタラプタにより、測定する方法がある。物理パラメータの内部モデルの推定をシステム同定により推定する。

これらの方法により、マンソンサイクルエンジンを搭載した三輪車の解析を行っていく予定である。

4 結論

本実験では、マンソンサイクルエンジンのモデリングを行った。また、導出したモデルを用いてエンジンがどのように動作するかをシミュレーションプログラムを作成することで解析した。また、解析によってエンジンの仕様の選定を行った。

しかし、エンジンの実機の作成では、高い加工精度が要求されることから、現在所持している加工機具では加工が困難であること、外注すると加工費用が高額になることから、今回は実機の作成まで完了させることができなかった。

そのため現在、限られた制約の中エンジンを作るための開発プロセスを考えている。また現在、加工機具については手配すれば借りることができる状態である。

5 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。