

熱磁気エンジンカーをつくろう

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
伊東謙，佐久間智之，澤口英太，新原啓央，鈴木佑多

1 はじめに

近年，太陽光や風力を利用したエネルギー再利用が期待されており，熱エネルギーの再利用にも期待が寄せられている．そのなかでも比較的低温でも動力を得られる熱磁気エンジン(モータ)に注目する．そのために熱磁気エンジンを作製し，これを動力とした自動車模型を実現する．

そもそも熱磁気エンジンとは，感温磁性体と呼ばれる磁性材料の磁気特性の温度依存性を利用して，熱エネルギーと磁気エネルギーを直接運動エネルギーに変換する方式のものである．つまり，駆動させるために電力を必要とせず，運転時に CO_2 を排出しない．ここで磁気特性とは，鉄などの強磁性体の温度を上げていくと，キュリー点と呼ばれる磁性を失う境界温度に達する特徴のことである．

内燃機関や電気モータと比較して，簡単な構造と仕組みで動力を発生させることのできる点から，実際に作製した模型車の実現を通して，工場，一般家庭で排出される熱エネルギーの有効活用について考える．

感温磁性体

一般には上記のような特徴を有するものを指すが，実用化されている感温磁性材料は，使用温度の下限 T_1 と上限温度 T_2 との間にキュリー温度を持ち，かつキュリー温度近傍でその磁気特性が急変するものである．

強磁性体

磁石にくっつく磁性体とくっつかない非磁性体があり，一般的に強磁性体を磁性体と呼び，常磁性体，反磁性体，反強磁性体などを非磁性体と呼ぶ．

図 1 の (a) のような磁気モーメントがバラバラなものや，(b) のように磁気モーメントがそろっていても隣り同士が反対では磁化が現れない．磁化が現れるためには，(c) のように磁気モーメントが同じ方向にそろっている(フェロ(強)磁性)か，図 (d) のように反対方向にそろっていても磁気モーメントの大きさか，数が違う(フェリ特性)必要がある．

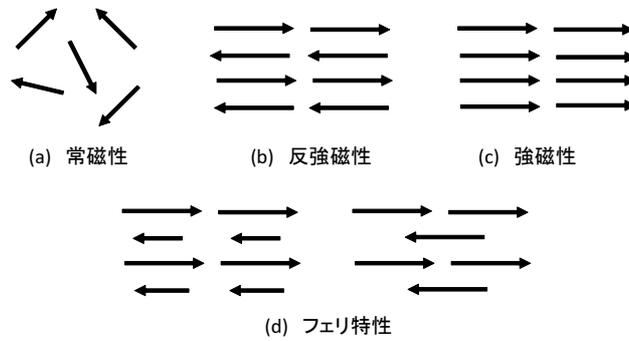


図 1: 様々な種類の磁性

2 実験目的

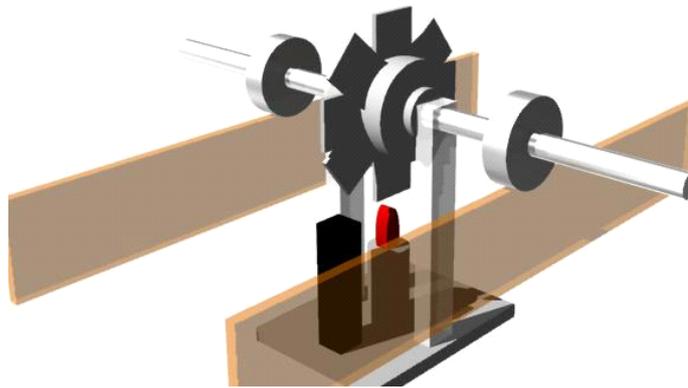


図 2: 熱磁気エンジンカーモデル

本実験では図 2 のような、動力部のプロペラにより車輪を回転させる熱磁気エンジンカーを作製する。それにより、熱磁気エンジンの動作原理を楽しく学ぶことのできる教材の実現を目指すとともに、熱エネルギーの有効活用についても考える。実現を目指すためにいくつかのサブテーマを設け、それらを順次達成していく。

- 熱磁気エンジンの原理を体験的に理解するための実験を行う
- 動力部の検証のための実験を行う
- 実際に模型車を造り走行させることにより、熱磁気エンジンの実用性を確認する

3 熱磁気エンジンのメカニズムについて

熱エネルギーから機械エネルギーへの変換について，図3のように感温磁心を用いて説明する．
(a)のようにNS極間に強磁性片がある場合，力 F で磁極間隙に吸引される．このとき(b)のように，磁性片がNS極間に対して対称の位置にあるときは静止する．これに対して(c)に示すように，斜線部のところを何らかの方法でキュリー点以上まで加熱すると，その部分は磁性を失い，磁極NSと磁性片の関係は(a)の場合と同様になり，矢印の方向に移動する..

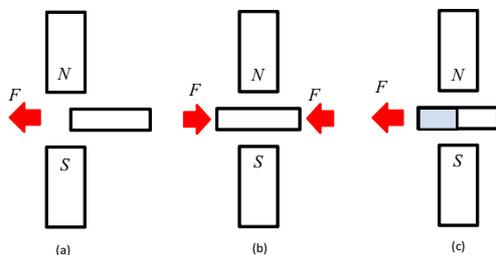


図 3: 感温磁心によるトルク発生原理

4 針金を使用した常磁性と強磁性のサイクル実験

4.1 実験内容

本章では，磁性体がキュリー点に達したときに磁性を失い，冷ましたら磁性が戻ることを確認するのが目的である．まず鉄の針金を捻ってYの字の形にして，図4のように軸となる釘に回転できるように取り付ける．このとき針金の一端をキュリー点以上に達するまで加熱すると，強磁性を失い常磁性となり，もう片方の針金が熱源の前に置いた永久磁石に引き付けられる．そして常磁性となった針金は熱源から遠ざかることにより，再び強磁性となり，永久磁石に引き付けられる．このサイクルを続けるか確認する．なお針金（鉄）のキュリー温度は約770である．



図 4: キュリー点を利用した針金の消磁実験機

4.2 実験手順

1. 針金の一端をキュリー点に達するまで熱し常磁性にする .
2. 熱せられてない強磁性の針金が永久磁石に引き付けられ , 火元に来るか確認する .
3. 常磁性となった針金が再び強磁性となり , 磁石に引き付けられ , 火元に戻るか確認する .



図 5: 針金を利用した消磁実験の様子

4.3 実験結果



図 6: 針金の一端が永久磁石に引き付けられる様子

図 6 のように , 針金の一端を熱して常磁性にすることにより , もう片方の針金を引き付けられることができた . さらに , 常磁性となった針金が再び強磁性となり , 永久磁石に引き付けられることを確認した . つまり常磁性 強磁性 , 強磁性 常磁性のサイクルを利用することにより , 針金は挙動を続けている . この理論を利用し , 目的の熱磁気エンジンカーを製作する .

5 動力部となるプロペラの作製と実証

5.1 実験内容

実験1の応用として、図7のようなニッケル(キュリー温度: 約354℃)を加工したプロペラに対して、スリットを1つ選び、ロウソクを用いて熱を加え消磁させ常磁性にする。そしてその隣の強磁性を保っているスリットが永久磁石に引き付けられるか確認する。これにより、模型車の動力部として利用できるか実証を行う。

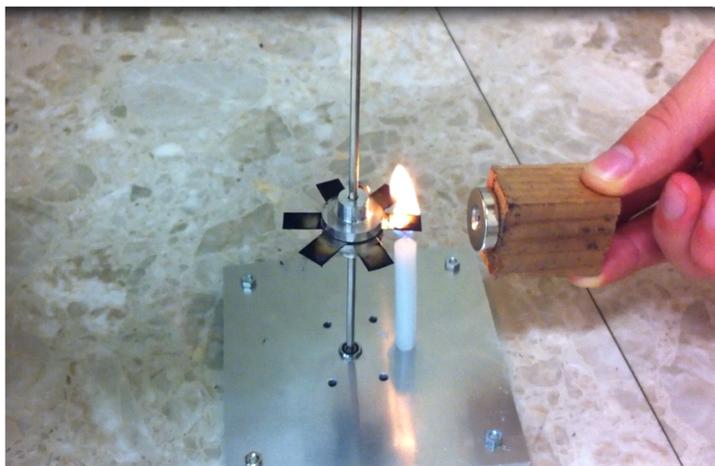


図7: プロペラの動力検証用の実験機

5.2 実験手順

1. 軸に取り付けた車輪のスリットに熱を加えて消磁させる。
2. 図8のように熱を加えたスリットの隣のスリットが永久磁石に引き付けられ、その動作が続き、回転するか検証を行う。このとき永久磁石は火元の前にある。

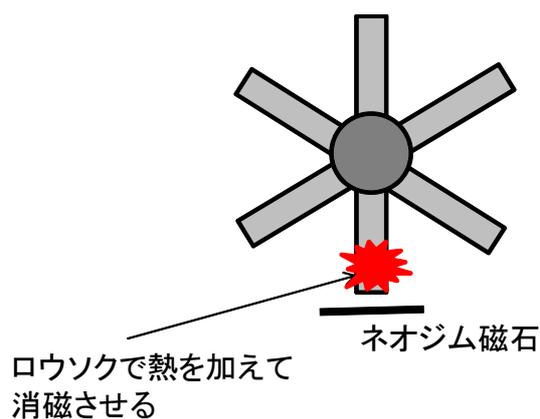


図8: プロペラの検証実験

5.3 実験結果

実験を行った結果，回転動作を続けない，また回転方向が一律でない問題点が生じてしまった．考えられる問題点としては，スリット幅の間隔，またそれに伴って永久磁石の配置が挙げられる．図9の(a)のように永久磁石を配置して，スリット α に熱を加えて消磁させても，ス

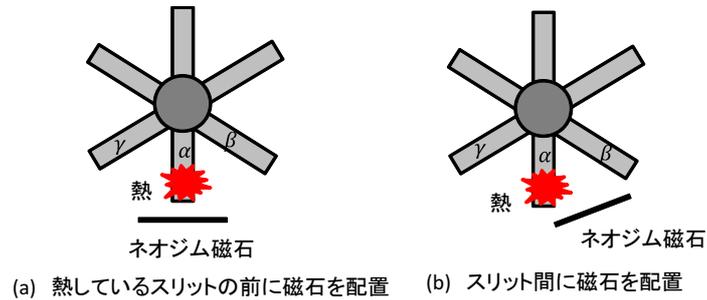


図9: プロペラの動作様子

リット β ， γ どちらとも引き付けられず，また引き付けられたとしても，磁石の微妙な位置に左右されたため，2回目以降の動作が実現できなくなる．(b)のようにスリット間に永久磁石を配置した場合は，永久磁石の持つ磁場が届かないため，スリット α を熱して消磁させてもスリット β が引き付けられない．また少しでも β 側に永久磁石を配置すると，スリット α が消磁される前にスリット β が引き付けられて意味を成さなくなり，これも2回目以降の動作が実現できない．

これらの問題点の解決策を考える必要がある．

5.3.1 問題点の改善

問題を解決するために，スリットの数を増やしてみる．また図10のようにロウソクを増やし，1つではなく同時に2つのスリットに熱を加えた．

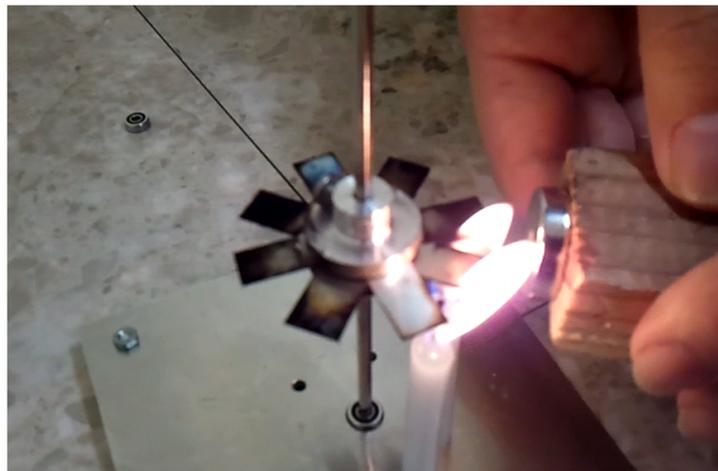


図10: スリットと熱源を増やしたプロペラ

図 11 に示すように消磁させるスリットを増やすことにより，永久磁石の持つ磁場の影響を受けるスリットを常に 1 つに絞れることができ，回転方向を定めることができた．しかし，回転数としては 5[rpm] で，大出力を得るには難しい．

加熱部の温度上昇，それ以外のスリットの冷める早さ，この 2 つが回転する速度を決め，熱磁気エンジンの性能を左右させると考える．

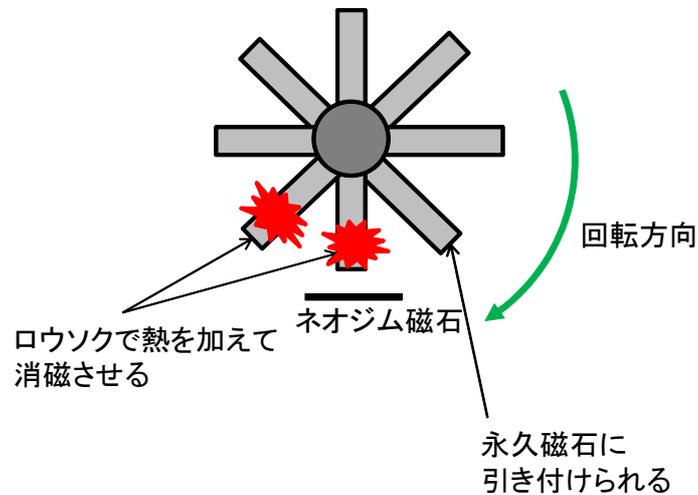


図 11: 8スリットのプロペラの動作様子

6 熱磁気エンジンカーの走行

6.1 実験内容

本章では，図 12 のような，レールと見なした 2 つの板の上を走行する熱磁気エンジンカーを作製する．機構としては，先の 8スリットのプロペラを動力として利用し，その回転力によりアルミ製の車輪と見なした円盤を回転させる仕組みとなっている．加熱方法はロウソクを用いる．基本的な原理は先の実験と同様である．

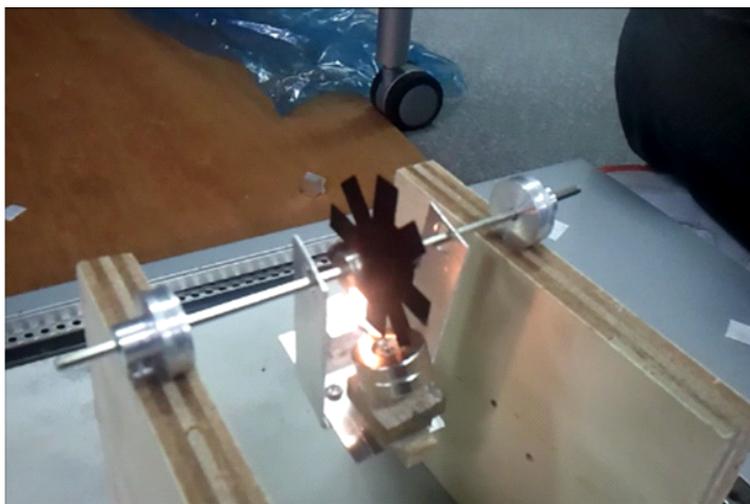


図 12: 作製した熱磁気エンジンカー

6.2 実験手順

1. 動力となるプロペラのスリットの一部を加熱し，常磁性にする．そして，永久磁石の近くにある強磁性のスリットを火元に近づける．このサイクルを続けてプロペラを回転させる．
2. プロペラの回転により，車輪と見なしたアルミ製の円盤を回転させ，走行させる．

6.3 実験結果

作製した熱磁気エンジンカーの車輪を，約 $12[cm]$ の板の上に乗せて走行させた．走行している様子を図 13，図 14 に示す．板の端から端まで移動するのに約 2 分間掛かったことから，作製した熱磁気エンジンカーの速度は

$$\frac{12[cm]}{120[s]} = 0.1[m/s]$$

であった．プロペラの 1 分あたりの回転数が低いため，走行も遅いことがわかる．

速く走行させる，つまり回転数を上げるには，加熱部のスリットを瞬時に常磁性にして，かつ他のスリットが永久磁石に引き付けられやすくするために，吸熱してより磁性を強くする必要がある．また，ネオジム磁石自身が暖められて磁性が弱くなっていることも考えられるので，局所的に加熱する方法を考えるか，もしくはネオジム磁石の吸熱も考える必要がある．さらに使用している磁性材料をニッケルではなく，キュリー点付近で瞬時に磁気特性が変わるものにするすることで，より回転速度を上げられると考えられる．

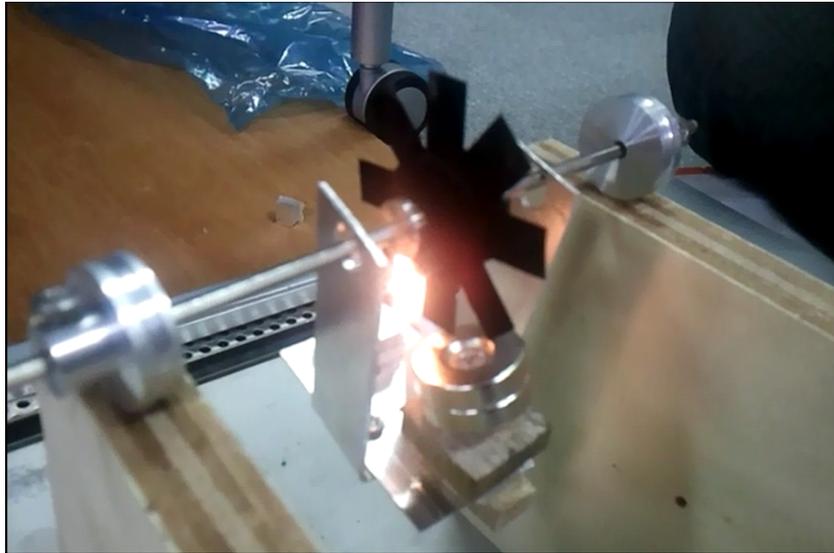


図 13: 熱磁気エンジンカーの走行様子 1

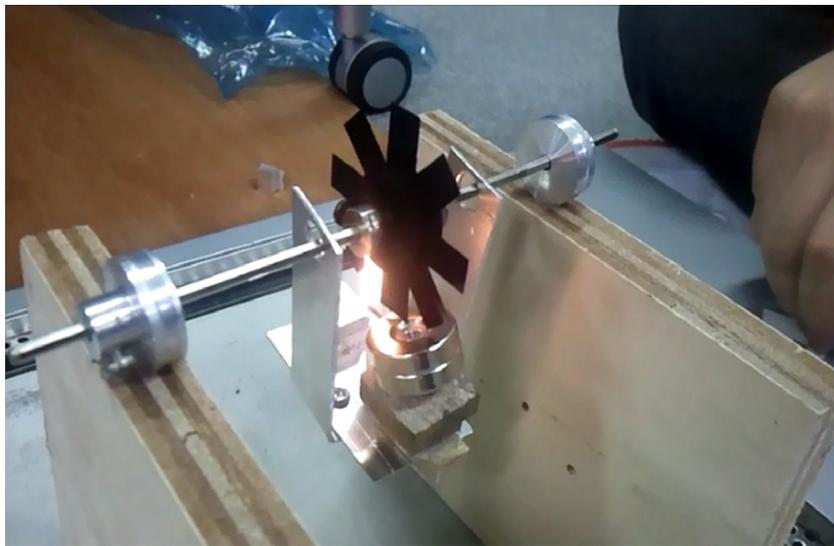


図 14: 熱磁気エンジンカーの走行様子 2

7 結論

熱磁気エンジンの原理について調査し、この仕組みを用いた動力機構の考案を行った。まず針金と磁石、ロウソクを用いた簡単な装置を作製し、熱磁気エンジンの動作原理の確認を行った。このとき、隣り合った2本の針金のうち、一本をロウソクによって加熱することで、その針金がキュリー温度に到達し常磁性化、同時に加熱していない針金が磁石によって引き寄せられる現象を確認した。しかし、針金（鉄）のキュリー点は比較的高温であるため、加熱によって常磁性化するまでに時間を要してしまい、効率の良い動力として利用するのは難しいことがわかった。先の実験結果を踏まえ、次に磁性材料を変更し、キュリー温度が鉄の半分以下であるニッケルを用いてプロペラ型の動力車輪を作製した。この車輪とロウソク、磁石を用いて、熱磁気エンジンの実験を行った結果、ある程度決まった周期で車輪が回転することを確認した。この結果から、熱源にロウソクを用いる場合、熱磁気エンジンに使用する磁性体は鉄よりキュリー温度が低いニッケルのほうが高効率であることがわかった。次にこのプロペラ型車輪を動力に用いた車両を作製した。磁石とロウソクを固定し、車輪の両端に車輪を取り付けレールの上に設置し実験を行った。その結果、ゆっくりではあるものの、熱磁気エンジンの回転によって車輪が回転し、レール上を車両が走行した。より速度を上げるためには、結果でも述べたように、効率のかつ局所的に加熱・吸熱する方法や、新たな磁性材料を考える必要がある。加熱方法としては光、例えば電球などを用いて光線を一箇所に集める（集光）ことで、局所的に加熱できると考える。また、熱湯や冷水を用いることで、温度の昇降を実現できると考えられる。磁性材料に対しては、キュリー点が常温から100度くらいまでのものを使用することで、比較的小さい熱エネルギーで済む。

今回作製した熱磁気エンジンは高効率・大出力を得ることは困難であったが、電源がなくともトルクが発生できるために、高信頼度を必要とする保護装置などに有用だと考えられる。

8 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。

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。