

太陽炉駆動スターリングエンジン船の製作

所属 山梨大学大学院医学工学総合教育部
機械システム工学専攻武田研究室
代表者氏名 大橋 明生
望月 敬史
横山 大貴

1. 緒言

近年、環境問題や化石燃料の枯渇が問題視される中で、自然エネルギーの利用が盛んである。その中でも身近に利用されているものの 1 つが太陽エネルギーである。太陽からの熱エネルギーがふく射により伝達されていることは周知の事実であるが、この膨大な量の熱エネルギーを有効に利用できているとは言えず、ほとんどの熱エネルギーは捨てられていると考えてよいかもしれない。今日では、太陽の光エネルギーは太陽光発電という形で利用されており、太陽光パネルは多くの一般家屋に取り付けられている。しかしながら、補助金を投入しないと普及に繋がらない状況にあり、今後さらなる発展が期待されている。そこで、我々は身近なものを利用した太陽熱利用システムを提案することとした。

本提案では、半球状の凹面鏡を利用し、太陽光を 1 点に集光することで高温の熱エネルギーが得られる「太陽炉」を用いて、これをスターリングエンジンの加熱源とし、スターリングエンジンの運動エネルギーによって船を動かすことを目的とした。また、スターリングエンジン内の作動媒体を空気の他に何種類か試験を行い、効率的に動かすことができる媒体について検討した。

2. 実験装置と駆動原理

2.1. スターリングエンジン

スターリングエンジンとは、シリンダー内の気体を外部から加熱・冷却し、その体積変化により仕事を得る外燃機関である。スターリングエンジンには様々な種類があるが、本提案では、身近にある物を使って製作できるビー玉スターリングエンジンを使用した。

Fig.1 にビー玉スターリングエンジンの概略図を示す。スターリングエンジンはディスプレイサー、メインシリンダー、パワーシリンダーから構成され、ディスプレイサーをビー玉、メインシリンダーを試験管、パワーシリンダーを注射器が担っている。試験管は、密封されている気体を外部より加熱・冷却する加熱器と冷却器及びシリンダーに相当し、ビー玉は試験管内部の空気を高温空間（加熱部）と低温空間（冷却部）に分割しその空間容積を変化させるディスプレイサーと呼ばれるピストンの役割に相当する。また、注射器は空気の膨張・収縮を動力として外部に取り出し、試験管を上下させるパワーピストンとそ

のシリンダーに相当する。
以下に作動原理を示す。

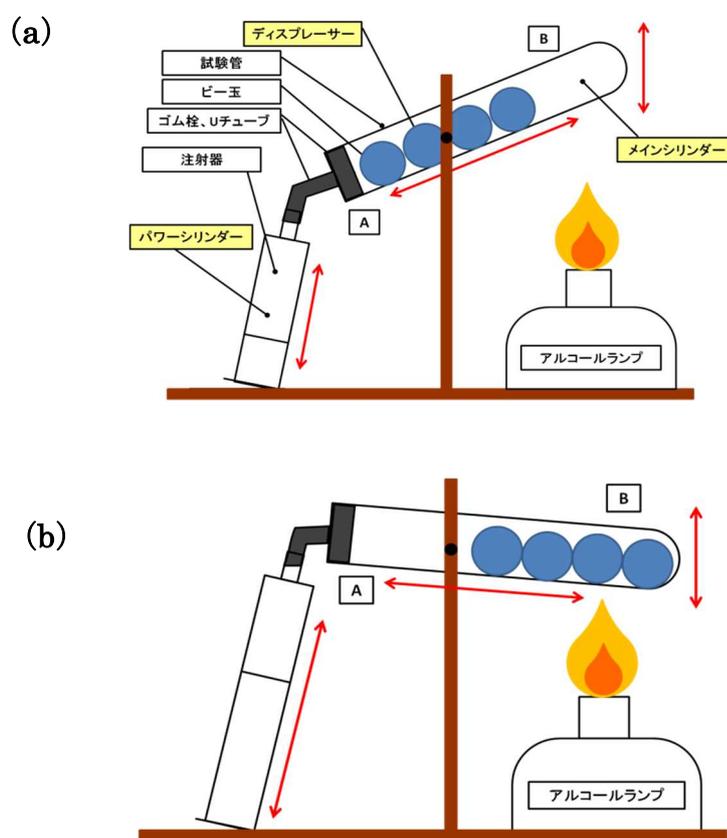


Fig.1 ビーズスターリングエンジンの概要及び作動原理

1. Fig.1 (a) のように、試験管のゴム栓部 (A 部) が下に傾き、注射器のピストンが押し込まれている状態で試験管の底部 (B 部) を加熱する。
2. 試験管内の空気が膨張し試験管を通過して注射器に入る。
3. 加熱された空気が注射器のピストンを押し、パワーシリンダーが上昇する。
4. 注射器と試験管はチューブで接続されているため A 部も上昇し、試験管の中のビーズが B 部に移動する。(Fig.1 (b))
5. ビーズが B 部に移動し、加熱された空気は A 部の方向に移動することで、移動した気体は冷却されて収縮し、注射器内の空気が試験管内に移動する。
6. 注射器内の空気がなくなると、パワーシリンダーは下がり、A 部も下降する。
7. A 部が B 部よりも下がると、ビーズは A 部に移動し、A 部の冷却された空気は B 部に移動する。(Fig.1 (a))

2.2. 太陽炉

太陽炉とは、太陽光を集光することで高温の熱を作り出す装置である。太陽光の集光方式には、凸レンズに光を通すことで光を屈折させ集光する屈折集光方式と平面鏡や凹面鏡の反射板を用いて集光する反射集光方式がある。直径 25cm の凹面鏡の反射板を用いることで、焦点位置に設置されたシリンダー内を 200°C 近くにする事が出来ると考えられる。反射集光方式には、反射板の形状によっていくつかの種類があるが、本提案では、Fig.2 に示すように凹面反射板を用いた小型化が容易な放物面鏡ディッシュ型太陽炉を用いて反射集光方式で集光し高温を作りだしてスターリングエンジンの熱源とした。

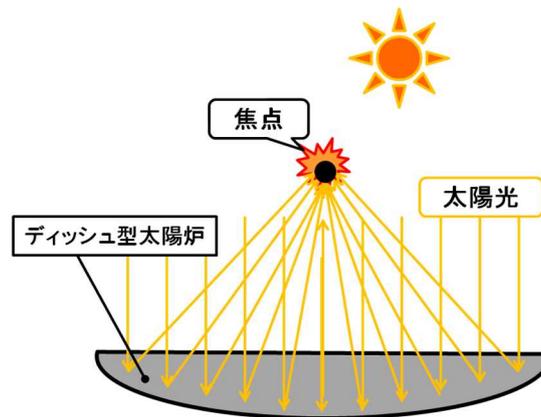


Fig.2 放物面鏡ディッシュ型太陽炉

2.3. フレネルレンズ

フレネルレンズは、通常のレンズを同心円状の領域に分割し厚みを減らしたレンズであり、レンズの表面を細かく分解して平面に配置したような断面をしている。よって、分割数を多くすればするほどレンズ自身は薄くなる。しかし、同心円状の線が入ってしまう欠点や、像が綺麗にできないことから、光を集めるために利用されることが多い。本実験では、太陽炉の軽量化を図るため、フレネルレンズについても検討した。Fig.3 はフレネルレンズにより光が回折する様子を表している。

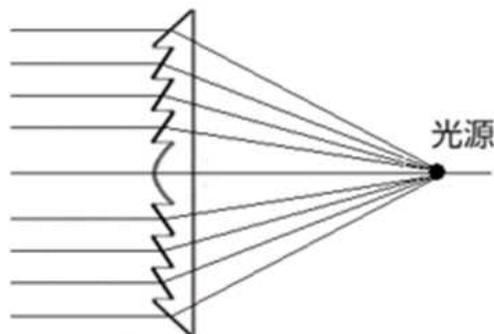


Fig.3 フレネルレンズの光の進み方

3. 実験の目的

今回提案する実験では, Fig.4 に示すように太陽炉をスターリングエンジンの加熱源とし, スターリングエンジンの運動エネルギーによって船を動かすこととした.

船を駆動させるために, 以下の手順で実験を進めた.

1. 放物面鏡ディッシュ型太陽炉を製作し, 日射量及び集熱箇所と集熱量の関係を調べる.
2. 太陽炉の設置条件を最適化し, 太陽熱を効率良く集熱させる.
3. 試験管内に封入する媒体を空気とアルコールに分けて実験を行う.

船を動かすシステムを実現するに当たって, 太陽炉で熱を試験管の端に集中的に集熱することと, ビー玉スターリングエンジンを動かすための十分な熱量を太陽炉で得ることが難しい点であると予想した.

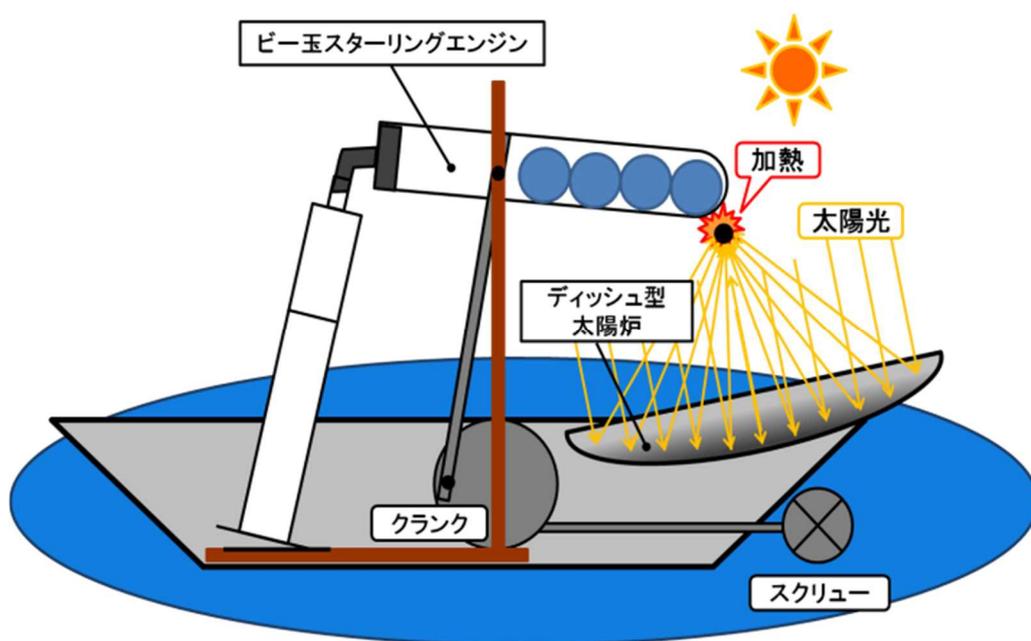


Fig. 4 船を駆動する仕組み

4.1 ソーラークッカー・あさがおによる集熱実験

ソーラークッカー・あさがおにより試験管にどの程度集熱できるか確認するため、以下のような部品で構成される実験装置を製作し、集熱実験を行った。

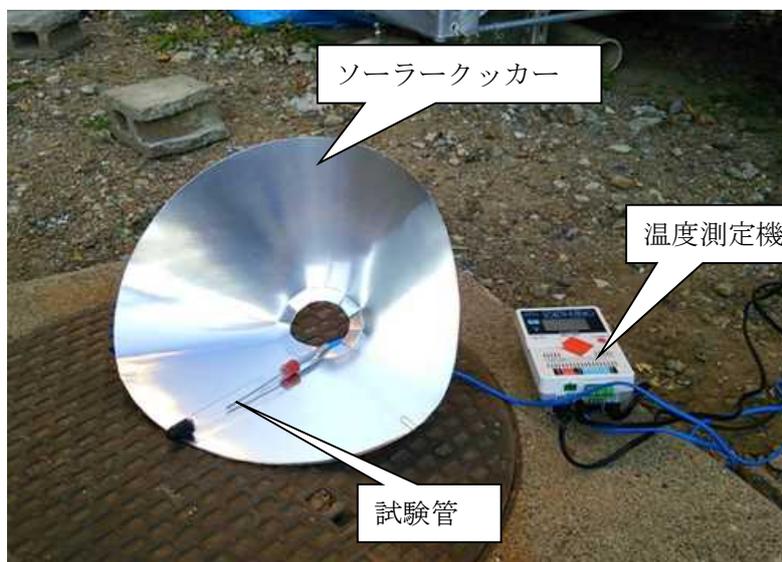


Fig. 8 ソーラークッカー・あさがおを用いた集熱実験装置

- (1) ソーラークッカー・あさがおの底部に試験管を配置し、試験管に K 型熱電対を挿入し、温度測定機 (LOGTHERMO DGL0100, 株式会社八光電機) に繋げて温度を計測した。
- (2) ソーラークッカー・あさがおを太陽の当たる場所に任意の時間放置してデータを採取した。

ソーラークッカー・あさがおによる集熱実験の結果を Fig. 9 に示す。計測は 10:20 から 16:40 まで行われ、南向きに設置し、その間の外気温はおおよそ 30°C で一定であり、太陽はおおよそ 95 度移動した。外気温及び日照時間は気象庁の気象観測データを引用したものである。試験管内の温度は 15:00 頃に最高で 64.5°C まで上昇した。また、太陽が大きく移動したにもかかわらず、全ての時間帯で日照時には試験管内温度が上昇した。また、外気温がほぼ一定を示しているにもかかわらず、試験管内温度が大きく変動している原因について考えると、試験管内温度は日射量の影響が支配的であるため、例え外気温が一定であっても、太陽が雲に隠れてしまい太陽光が太陽光集熱器に当たらないと、試験管内温度は低下してしまう。これは、10 分ごとの日照時間データとは比較的同様の傾向を示している。

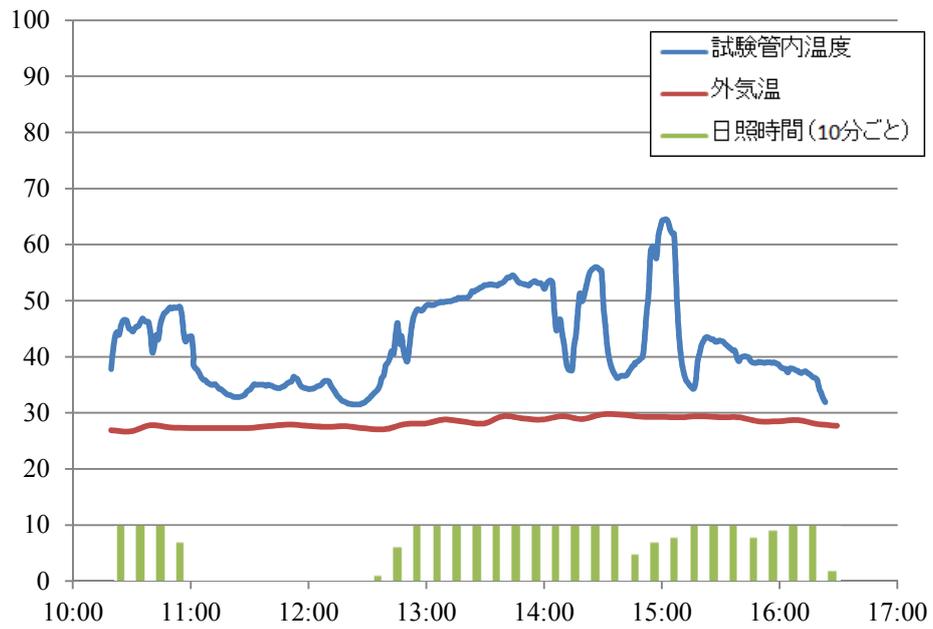


Fig. 9 ソーラークッカーによる集熱結果

4.2 ソーラーオーブンによる集熱実験

ソーラーオーブンにより試験管にどの程度集熱できるか確認するため、以下のような実験装置を製作し、集熱実験を行った。

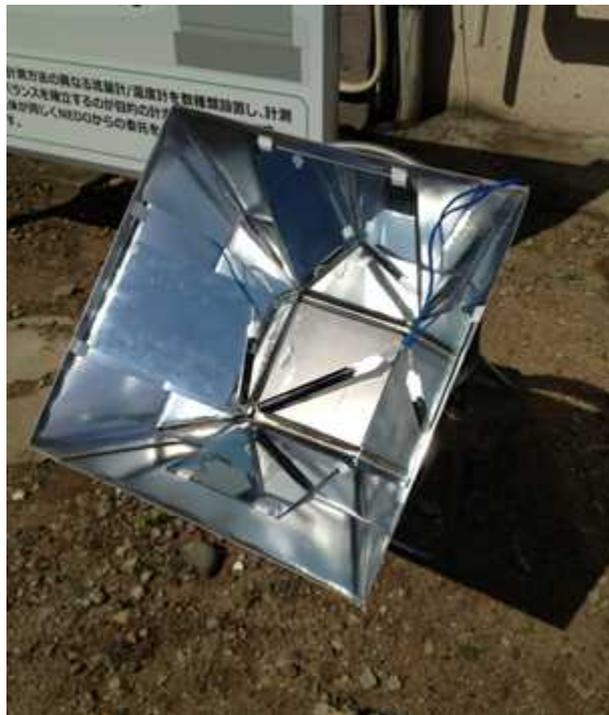


Fig. 10 ソーラーオーブンを用いた集熱実験装置

- (1) ソーラーオープン底部の最も集熱される箇所に試験管を配置し、試験管に K 型熱電対を挿入し、温度測定機に繋げて温度を計測した。
- (2) ソーラーオープンを太陽の当たる場所に任意の時間放置してデータを採取した。

ソーラーオープンによる集熱実験の結果を Fig. 11 に示す。計測は 10:30 から 16:00 まで行い、南向きに設置し、その間の外気温はおよそ 30°C で一定であり、太陽はおよそ 88 度移動した。外気温は気象庁の気象観測データを引用したものである。試験管内の温度は 13:00 頃に最高で 75.8°C まで上昇した。ソーラークッカーによる集熱結果を示した Fig. 9 と比較すると、こちらも外気温がほぼ一定を示しているにもかかわらず、試験管内温度が大きく変動している。原因は同じく、試験管内温度は日射量の影響が支配的であり、例え外気温が変動しなくとも、太陽が雲に隠れてしまって太陽光が太陽光集熱器に当たらないと、試験管内温度は低下してしまうためであると考えられる。

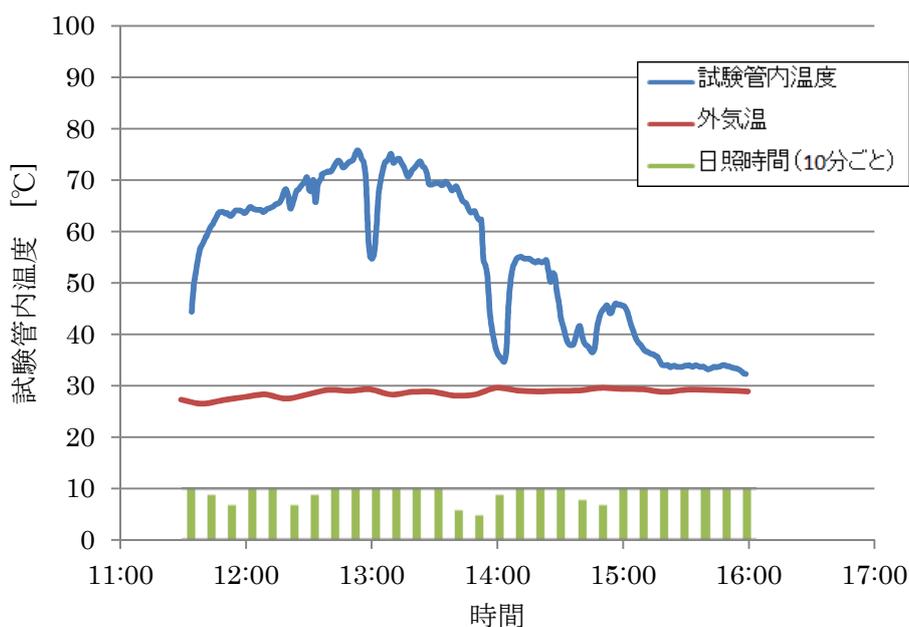


Fig. 11 ソーラーオープンによる集熱結果

2 種類のディッシュ型太陽炉を用いた場合の試験管内温度変化を比較すると、試験管内の最高温度はソーラーオープンの方が 10°C 以上高くなることが分かった。したがって、ソーラーオープンの方のソーラークッカーに比べて集熱能力が良く、また、船に取り付けやすいと考えられるため、ソーラーオープンをスターリングエンジンの駆動源として採用し、さらに集熱能力を向上させるために以下の改良を加えた。

4.2.1 試験管及びソーラーオープンの改良

試験管は透明のため光の透過率が非常に高いと考えられたので、試験管底部の集熱部をマジックにより黒く塗ることで集熱能力を向上させた。そして、その試験管をソーラーオープンに設置して同様の実験を行った。Fig.12 はその実験結果である。試験管内温度は 13:00 頃に 91.6℃まで上昇した。黒塗りしていない状態と比較して、最高温度が 15℃程度上昇したため、集熱能力の向上に対して十分な効果があったと考えられる。

また、ソーラーオープン自体の集熱能力を向上させるため、反射率向上を図ってソーラーオープンの反射面に鏡を張り付けた様子を Fig. 13, その状態で底部を黒く塗った試験管を用いて同様の実験を行った結果を Fig. 14 に示す。試験管内温度は 13:50 頃に 91.5℃まで上昇した。この結果は鏡を張っていない状態の実験結果である Fig.12 と比べて、ほとんど変化していない。したがって、反射部に鏡を張り付けることは試験管内温度の上昇には効果がないものと考えられる。

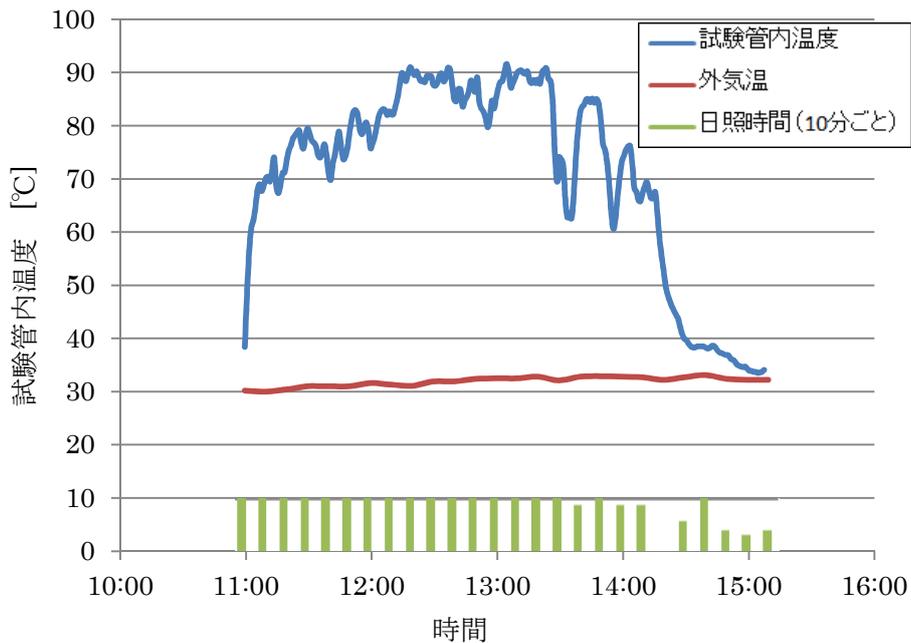


Fig. 12 黒く塗った試験管を設置したソーラーオープンによる集熱結果



Fig. 13 ソーラーオーブン（鏡あり）

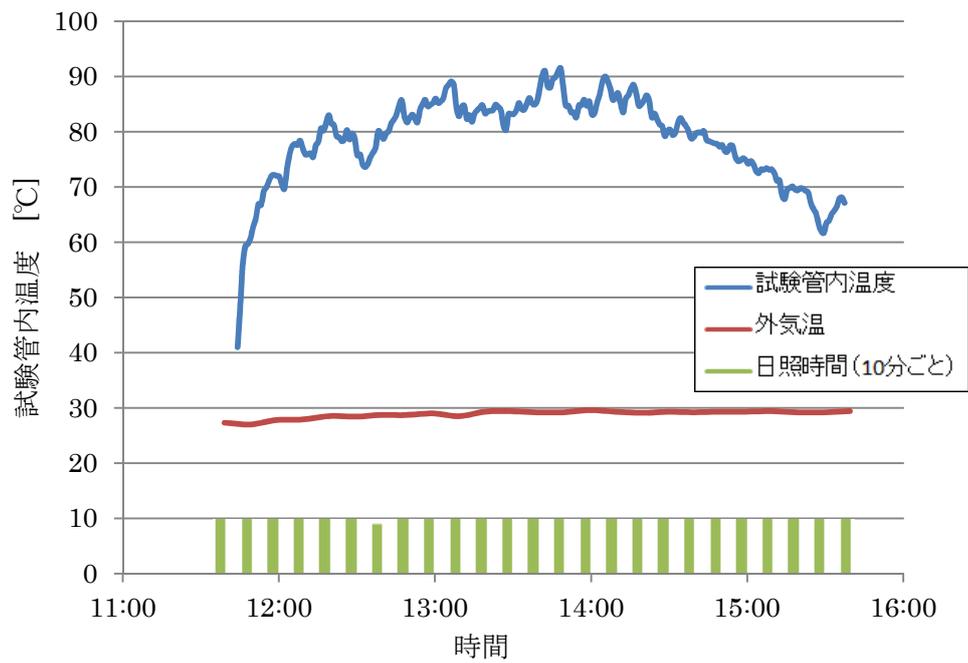


Fig. 14 黒く塗った試験管を設置したソーラーオーブン（鏡あり）による集熱結果

以上の結果より、ソーラーオープンでは試験管の先端部（集熱部）を黒く塗った状態で、空気を封入媒体とすると、太陽の方向が 90 度程度移動しても十分集熱でき、試験管内部の温度は 90℃程度まで上昇することが分かった。しかしながら、この程度の温度では、スターリングエンジンを駆動させると試験管のピストン運動により温度が大幅に低下し、熱源としては不十分であると考えられる。これは、今回使用したディッシュ型太陽炉は放物面鏡ディッシュのように 1 点集光型ではなく、広範囲を加熱するものであるため放物面鏡に比べ集熱効率が低いことが原因であると考えられる。そこで、次に 1 点集光型の太陽光集熱器であるフレネルレンズを用いた実験を行うこととした。

4.3 フレネルレンズによる集熱実験

ソーラーオープンよりも高温の熱を集める太陽光集熱器として、フレネルレンズを用いて集熱実験を行った。2.3 節で述べた通り、フレネルレンズは、レンズの表面を細かく分解して平面に配置したような断面をしており、光を集めるために利用されることが多いため、太陽光による集熱に適していると考えられる。今回の実験では、集光部面積が縦 280mm、横 210mm、厚さ 2.5mm であり、A4 サイズのノートとほぼ同じ大きさのフレネルレンズを採用した。

フレネルレンズを用いた集熱実験の手順を以下に示す。

- (1) 温度測定機（LOGTHERMO DGL0100, 株式会社八光電機）の熱電対の温度計測部にフレネルレンズの焦点を合わせる。
- (2) フレネルレンズを手で支持し、熱電対の温度計測部に焦点を合わせた状態で任意の時間放置してデータを採取した。

フレネルレンズによる集熱実験の結果を Fig. 16 に示す。フレネルレンズによる集熱はグラフの開始点から頂点まで行われ、温度計測機の先端の温度は最高で 620.6℃まで上昇した。これはディッシュ型太陽炉を用いた集熱実験と比べ、6 倍以上の温度である。また、Fig. 16 の横軸は 1 分単位の時間が表されているので、ディッシュ型太陽炉を用いた集熱実験と比べて、温度上昇の速度が大きいことが分かる。短時間で高温の熱が得られることに加え、ディッシュ型太陽炉よりも小さく船に設置しやすいと考えられるため、フレネルレンズは優れた太陽光集熱器であるといえる。難点としては、焦点を温度計測部に正確に合わせていないとすぐに温度が落ちてしまうことと、太陽光が届いている状態でなければ集熱効果を発揮できない点である。しかしながら、それらの条件さえ整えばフレネルレンズはディッシュ型太陽炉に比べ集熱効果が高いことから、スターリングエンジン船の熱源としてフレネルレンズを採用することとした。

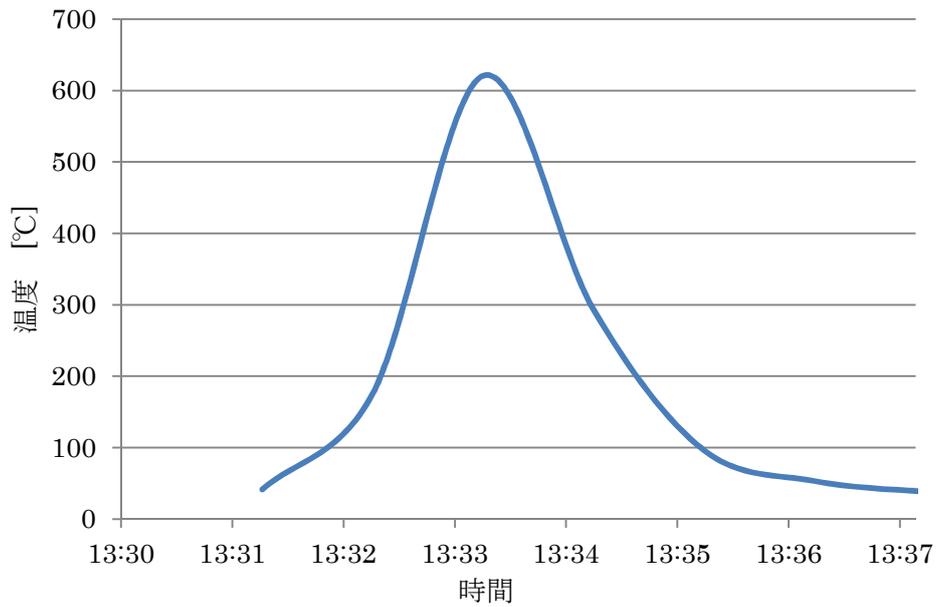


Fig. 16 フレネルレンズによる集熱結果

5. スターリングエンジンの駆動実験

5.1 ガスコンロの火を熱源としたスターリングエンジンの駆動実験

スターリングエンジンをスムーズに駆動させるため構造を簡略化したスターリングエンジンを製作し、容易に加熱するためガスコンロの火を熱源として駆動実験を行うことで、各構成要素の改良を行った。実験装置を Fig. 17 に示す。

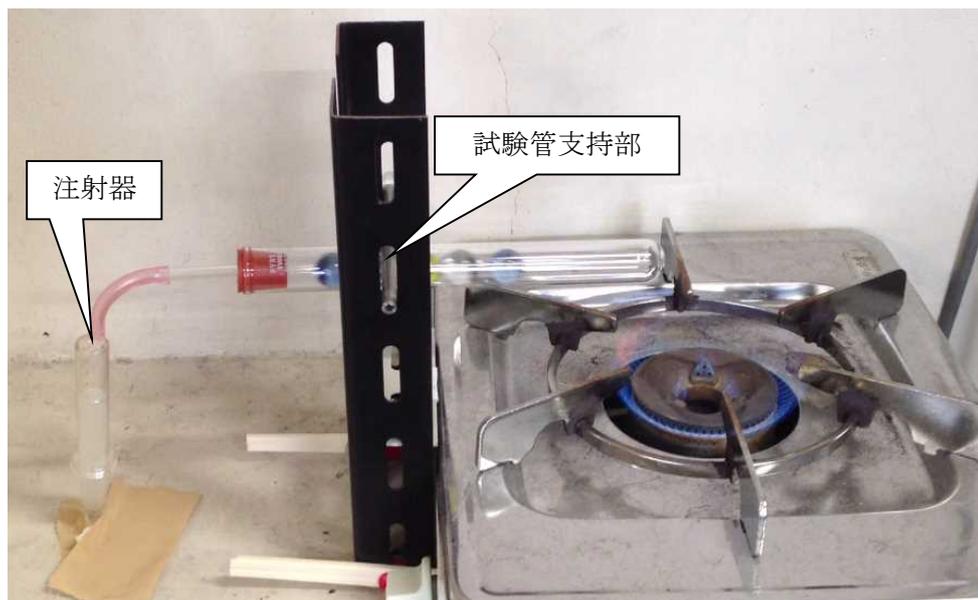


Fig. 17 ガスコンロの火を熱源としたスターリングエンジンの駆動実験

本実験で製作するスターリングエンジン船の熱源として用いるのはフレネルレンズであり、集熱実験では 600℃程度まで温度が上昇することが確認できたが、簡易実験に用いたガスコンロの火はおよそ 1500℃なので、それと比較すると熱量が足りないと考えられる。よって、スターリングエンジンを低い熱源温度でも駆動させやすくするために、試験管支持部と試験管内に入れるビー玉の数を最適化することを目的として、ガスコンロの火を熱源として用いたスターリングエンジンの駆動実験を、以下の条件を組み合わせ合わせた合計 9 条件で行った。

- ・試験管支持部について：試験管底部より 7cm, 8cm, 9cm の 3 条件
- ・ビー玉の数について：4 個, 5 個, 6 個の 3 条件

実験の結果、試験管支持部は試験管底部より 8cm の位置、ビー玉の数は 6 個のときが最もスムーズに稼働することが分かった。試験管支持部とビー玉の数は双方のバランスが重要で、試験管支持部の位置によってスターリングエンジンの周期や稼働域が決まり、ビー玉の数が周期と合わないときスターリングエンジンの動きとビー玉の動きがずれてしまい、途中で駆動速度が遅くなり停止してしまうことが分かった。

5.2 フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジンの駆動実験

ガスコンロの火によるスターリングエンジンの駆動を確認し、また、試験管支持部とビー玉数の最適化を行い、フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジンの駆動実験を行った。Fig. 18 に実験の様子を示す。

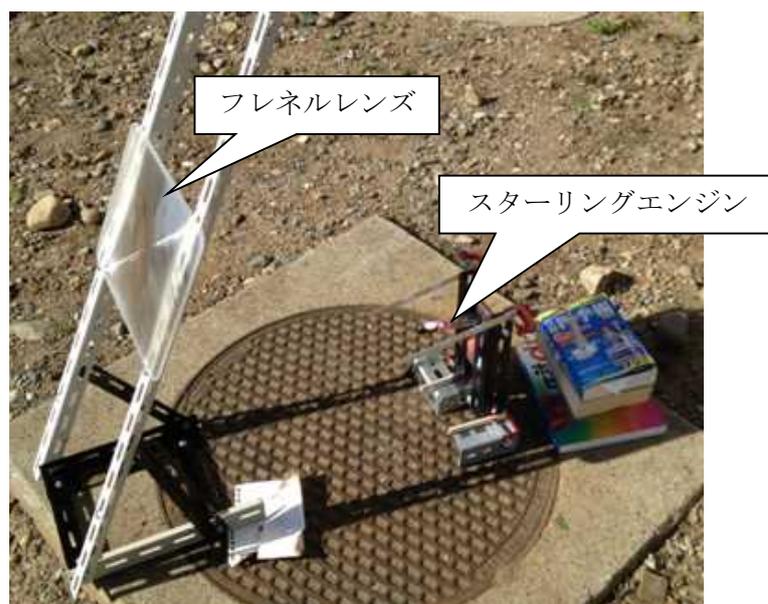


Fig. 18 フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジンの駆動実験

フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジンでは試験管内の空気は膨張するが収縮せず、また、膨張する速度も遅いため駆動しなかった。原因として考えられるのは、ガスコンロと比べて熱量が足りないことと、試験管内の封入媒体に空気を用いていた点である。ガスコンロを熱源としたスターリングエンジンならば、十分な熱量により試験管内の封入媒体が空気であっても、注射器がピストン運動するだけの膨張と収縮を繰り返すことが出来ていたが、フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジンでは空気を封入媒体とすると膨張と収縮が十分に行われず、注射器のピストン運動が得られないため、スターリングエンジンが駆動しなかった。そこで、試験管内の封入媒体を濃度 80%程度のアルコールに変更して再度、駆動実験を行った。

このアルコールの沸点はおよそ 60°Cであり、常温では液体、フレネルレンズで少し加熱すれば気体となる。その相変化を利用して膨張と収縮を行う。しかしながら、単にアルコールを試験管に入れるだけでは、試験管が傾いたときに試験管内のアルコールが注射器の方へ移動してしまい、上手く稼働しない。そこで、Fig. 18 のように試験管底部から 4cm 程度のところでダイヤモンドバンドソーを装着したコンタマシで切断し、アルミニウムの仕切り板を挟み、シーリング材で再び接着させた。これにより、スターリングエンジンの駆動の過程で試験管が傾いてもアルコールが試験管底部から移動しない状態となった。また、これまでの集熱実験では試験管底部全体を黒く塗っていたが、それでは太陽光が長手方向から見たときの上面で遮られてしまうため、太陽光を効率良くに集められないと考えた。そこで、下面だけ黒く塗って、太陽光が効率良くアルコールに伝わるよう工夫した。また、黒く塗った試験管とアルコールだけでは、太陽光の透過率が大きいことから、集めた太陽光を十分吸収できていないと考えられるため、アルコールと一緒に小さいアルミニウムの薄板を何枚か試験管底部に挿入した。この薄板が太陽光を効率良く吸収し、高温となるためアルコールに直接熱を伝えアルコールの温度が上昇しやすくなった。



Fig. 18 試験管底部の加工

Fig. 18 の試験管を用い、封入媒体をアルコールとしたところスターリングエンジンの駆動を確認した。しかしながら、駆動状態は不安定であり、フレネルレンズの焦点が正確にアルミニウムの薄板に合うとアルコールが勢いよく蒸発し、スターリングエンジンが駆動するが、少しでも焦点が合わず蒸発の勢いが弱いときや、試験管の支持部がずれてバランスが悪くなると、スターリングエンジンは安定に駆動しなかった。

6. フレネルレンズ駆動スターリングエンジン船の製作

以上の基礎実験結果を踏まえて、フレネルレンズを熱源としたスターリングエンジン船を製作した。製作にあたってスターリングエンジンの動力を船の推進力に変換する機構を2種類考案したので、それらを以下に示す。

6.1 オール型スターリングエンジン船

スターリングエンジンの駆動をそのまま船の推進力に変換する機構として、試験管支持部に試験管と垂直になるようプラスチック板を取り付け、その先端にオールを接着した。スターリングエンジンにプラスチック板、オールを取り付けている様子を Fig. 19 に示す。この機構は、スターリングエンジンがオールと直結しているため、スターリングエンジンが稼働し傾くことでオールも連動して動き、漕ぐことができる。したがって、スターリングエンジンの動力を最も無駄なく船の推進力に変換できる機構であると考えられる。また、実際にこの駆動機構を船に搭載した様子を Fig. 20 に示す。船のボディは発泡スチロールで製作し、L字型留め具とプラスチック板を用いてスターリングエンジンの支持部を製作した。

駆動実験の結果、オール型スターリングエンジン船はスターリングエンジンの駆動は確認したが、船は前進しなかった。原因として考えられるのは、オールを固定したため、スターリングエンジンの動きと連動して、前進の方向と後退の方向のどちらにも推進力が働いてしまったものと考えられる。これを改善するには、オールの形状を工夫するか、戻りの際はオールが水面から出るような機構にしなければならないと考えられるが、今回はオールを利用した駆動を諦め、次節に示す歯車機構により外輪を駆動させる機構を新たに考え、実験船を製作した。

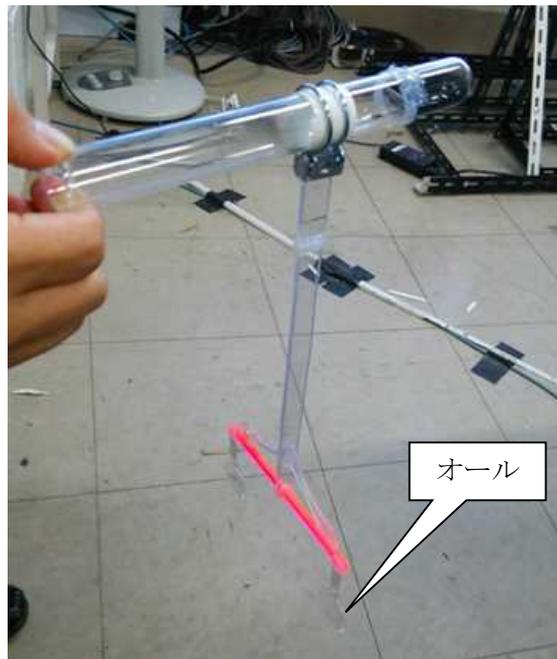


Fig. 19 船の駆動源 (オール型スターリングエンジン船)



Fig. 20 オール型スターリングエンジン船

6.2 外輪型スターリングエンジン船

オール型スターリングエンジン船はスターリングエンジンの動力を最も無駄なく船の推進力に変換できていたが、オールを2本搭載しているのみで推進力が弱いという欠点があった。そこで、推進力の向上を目的として、スターリングエンジンの動力にプラスチック板を加工して製作したラチェット機構による歯車の駆動を介して、外輪に伝える機構を考えた。スターリングエンジンは試験管の傾きによる往復運動のため、単純に歯車を用いた駆動では前進しない。そこで、歯車の動作方向を一方に制限できるラチェット機構を搭載した。ラチェット機構とは、のこぎり状の歯が刻まれている歯車と逆転止めの爪とが組み合わされた機構であり、爪が引っ掛かる方向に動くと歯車が回転し、反対方向に動くと爪が歯車の山の坂を滑って歯車は回転しないような仕組みである。実際に船に搭載したラチェット機構を Fig. 21 に示す。また、船全体の様子を Fig.22 に示す。ラチェット機構により回転した歯車が軸を介して外輪へ伝わり船が駆動する仕組みである。船のボディは発泡スチロールで製作し、発泡スチロールとプラスチック板を用いてスターリングエンジンの支持部を製作した。外輪が大きい分、オール型スターリングエンジン船に比べ水の抵抗を受けやすいため、ボディの発泡スチロールを厚くすることで外輪と水の接触面積を小さくし、抵抗を減らしている。

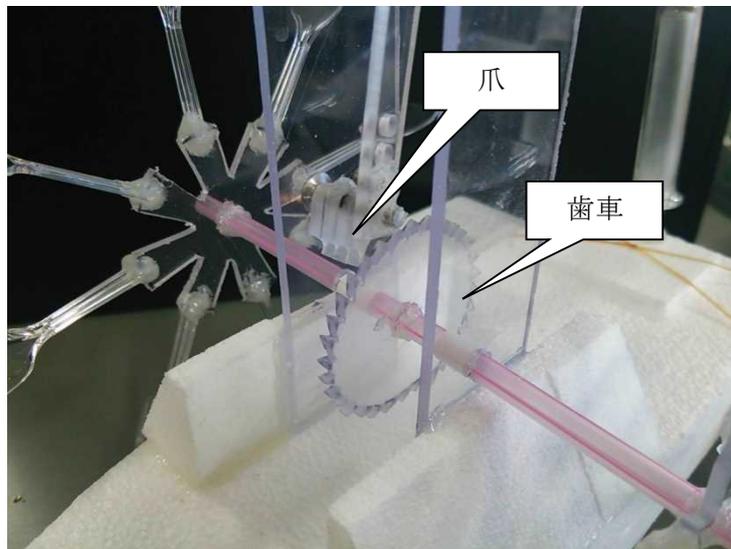


Fig. 21 船に搭載したラチェット機構

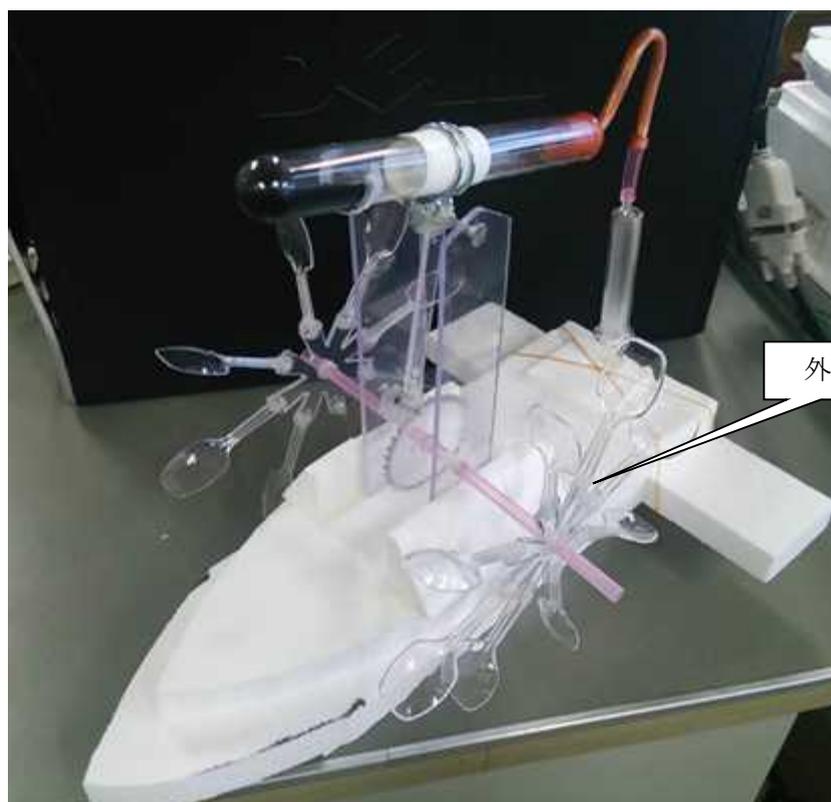


Fig.22 外輪型スターリングエンジン船

駆動実験の結果、不安定ではあるが、スターリングエンジンの動きに合わせて歯車と爪が噛み合い、外輪が動いた。外輪の駆動が不安定になってしまうのは、歯車と爪の初期位置の設定の仕方や噛み合わせの機密性が十分でなかったこと、水の抵抗に対するスターリングエンジンの動力が十分でなかったことが原因ではないかと考えられる。また、フレネルレンズを手で支持していたため、安定して集熱部に熱を与えられていなかったこともスターリングエンジンの動力が十分に発揮できなかった原因であると考えられる。

6.3 撮影動画

封入媒体を空気とした場合と、アルコールに変更して水に浮かべていない状態と浮かべている状態をまとめた動画を別途転載する。前述した通り、封入媒体を空気とした場合、スターリングエンジンは稼働せず、封入媒体をアルコールに変更すると稼働した。しかしながら、水に浮かべた状態では水の抵抗に対するスターリングエンジンの動力が十分でないことから、安定した駆動はしなかった。

7. 結言

本実験ではフレネルレンズをスターリングエンジンの加熱源とし、スターリングエンジンの運動エネルギーによって船を動かす実験を行った。その過程で得られた知見及び結果を以下に記す。

- (1) スターリングエンジンの熱源を決定するため、2種類のディッシュ型太陽炉とフレネルレンズを用いた基礎実験を行った。2タイプのディッシュ型太陽炉を用いた基礎実験の結果、試験管を黒く塗るなどの工夫を凝らしても、試験管内の温度は90℃までしか上昇せず、スターリングエンジンの熱源としては不十分であった。一方、フレネルレンズによる基礎実験の結果では、600℃程度の集熱能力を発揮したため、これを太陽光集熱器として実験を進めた。
- (2) スターリングエンジンをスムーズに駆動させるために、ガスコンロの火を熱源として基礎実験を行い、スターリングエンジンの構成要素の最適化を図った。その結果、試験管支持部は試験管底部より8cmの位置、ビー玉の数は6個のときが最もスムーズに稼働することが分かったため、船に搭載するスターリングエンジンにはこの組み合わせを採用した。
- (3) 封入媒体を沸点が60℃程度であるアルコールに変更し、その相変化を利用することで稼働させることに成功した。また、封入媒体をアルコールに変更するとともに、試験管底部を長手方向から見たときの下部を黒く塗ったことや、アルコールと一緒にアルミニウムの薄板を挿入して、効率良く集熱したこともスターリングエンジンの駆動に成功した要因である。
- (4) スターリングエンジンの動力を船の推進力に変換する機構として、オール型と外輪型の2種類を提案し、スターリングエンジン船を製作した。オール型はオールの戻りの機構を十分検討できなかったため、上手く前進しなかった。外輪型は水の抵抗やラチェット機構の機密性の影響により駆動が安定しなかったが、不安定ながらも外輪の駆動に成功した。
- (5) フレネルレンズを船に搭載する機構まで検討した実験船を製作することはできなかった。これは、太陽の向きや季節による角度の変化、船の駆動によって焦点がずれてしまい、船とフレネルレンズを一体型にすると、その動きに対応できないと予想されたためである。しかしながら、GPSや方位磁針などをプログラミングし太陽を追従するフレネルレンズを製作できれば自走式のスターリングエンジン船が実現できると考えている。

8. 謝辞

本実験は株式会社八光電機様より実験費の助成を受け賜りました。また、熱の実験コンテストという貴重な場を設けて頂き深く感謝の意を表します。

また、本実験を行うにあたり丁寧かつ熱心なご指導をして下さった武田哲明教授、船谷俊平助教には、深く感謝致します。そして多くのご指摘かつ協力して下さいました武田研究室の皆様にも感謝致します。