

太陽で船を動かそう！

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 稲葉 隆介

堤 顕太郎

松田 直樹

1. はじめに

地球には、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。しかしながら、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。そこで、真空二重管とヒートパイプを用いてふく射により温められた水から熱を回収し、ペルチェ素子を用いて、その熱で素子の面間に温度差を生じさせ、ゼーベック効果による熱電変換によって電気を作り出し、有効活用できないかと考えて本提案に至った。

本提案では、真空二重管とヒートパイプを用いて、効率良く熱エネルギーを回収し、回収した熱エネルギーをペルチェ素子に与えて熱電発電を行い、発電した電力を蓄電装置に蓄電させて、ふく射による太陽熱エネルギーを獲得しにくい天気の悪い日でもモーターが動くようなおもちゃのシステムを製作することを目的とする。

2. 実験に用いる装置および原理

2.1. ヒートパイプ

ヒートパイプとは Fig.1 に示すような、密閉容器内に相変化しやすい少量の作動流体を真空密封し、内壁に毛細管構造（ウィック）を備えた熱輸送に長けた装置である。ヒートパイプの高温部である蒸発部が加熱されると、作動流体が蒸発し低温部である凝縮部へと流れる。この際に潜熱として蒸気に熱が伝えられる。凝縮部へ流れた蒸気は、気液界面で凝縮し、潜熱を放出する。凝縮した作動流体は、ウィックを通して凝縮部から蒸発部へ毛細管圧力によって還流する。

以上のサイクルを繰り返すことにより熱を他の離れた場所及び、広域面積へ輸送することが可能となる。

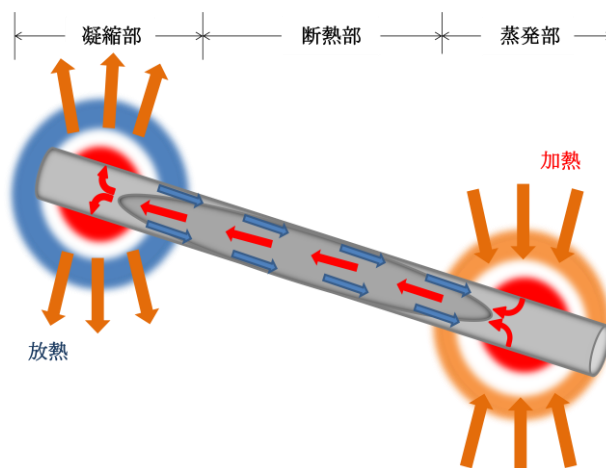


Fig.1 ヒートパイプの仕組み

2.2. ペルチェ素子

ペルチェ素子は、熱電素子の一種である。電気を流すとペルチェ効果により素子の上下の面において発熱と吸熱が発生し、熱が移動する。逆に素子に温度差を与えることでゼーベック効果により電圧、電流が得られる。ペルチェ素子の両側に有効な温度差を与えることで電気を作り出すことができる。Fig.2 に原理の概略図を示す。今回用いるペルチェ素子は、温度差約 6°C の場合、電圧約 0.3V の発電が可能である。

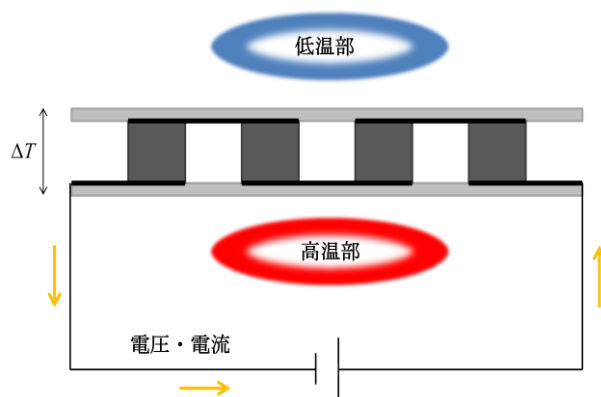


Fig.2 ペルチェ素子の仕組み

2.3. 真空二重管

真空二重管とは Fig.3 に示すように、二重のガラス管であり、外側と内側の間が真空層となっているため熱伝導による放熱がなく、一度吸収した熱を逃がさない構造となっている。また、外ガラスは透明、内ガラスは黒色に吸収膜として塗装されている。これによりガラス管内に水を入れることで晴れの日であれば、2 時間ほどで 100°C 前後まで上昇させることが可能である。

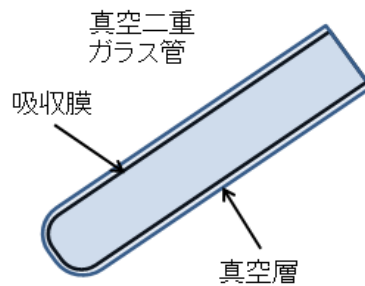


Fig.3 真空二重管の仕組み

3. 実験の目的

今回提案する実験では、Fig.4 に示すように真空二重管、ペルチェ素子、ヒートパイプを用いて、太陽熱により自ら発電して動く、おもちゃの船を製作することとした。

この実験を成功させる為に以下の目標を設定した。

- (1) 真空二重管内の熱エネルギーを効率よく取り出し、できるだけ大きな温度差を取り出せるシステムを製作する！
- (2) モーターが動く程度の発電量を得る！
- (3) 蓄電装置に電気を蓄えて、天気の良い日でも動くような装置を製作する！

以上の 3 つの段階を考えて、最終目標とする太陽熱で動くおもちゃの船を製作する。製作にあたっては、如何に蓄電させて、また蓄電装置から損失を押さえてモーターに出力できるかが難しい部分であると予想している。そこで、まずは蓄電装置を設けず、ペルチェ素子で発電した電気を直接モーターに与え、船を動かし、その後で蓄電装置を加えた装置の製作を行うこととした。

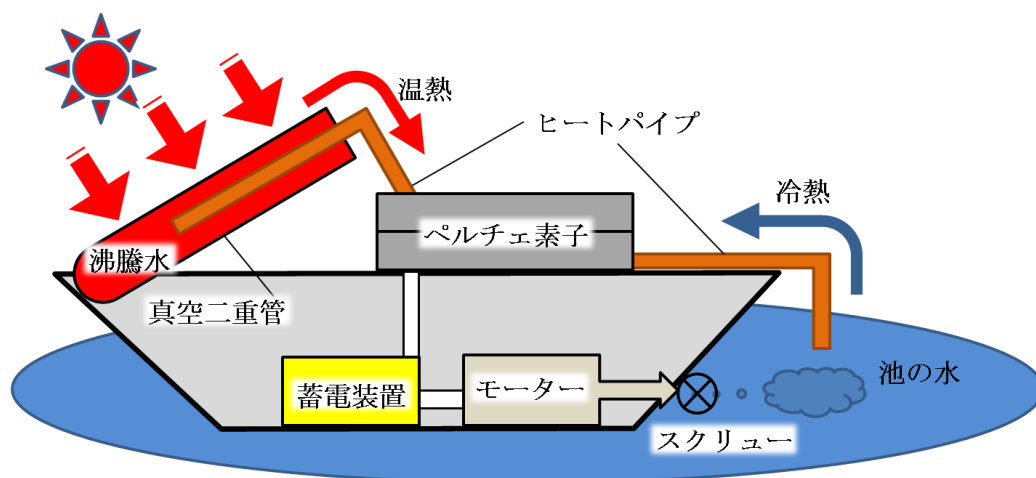


Fig.4 船を動かす仕組み

4. 実験装置及び実験方法

基礎実験として、以下に示すペルチェ素子，真空二重管，ヒートパイプを用いて実験を行った．

- ・ペルチェ素子：TZ03023-01，研究室で用意した素子
- ・真空二重管：真空管式太陽熱調理器エコ作，TEMC 株式会社寺田鉄工所
- ・ヒートパイプ：ヒートパイプ（銅水）CWK，片岡線材株式会社

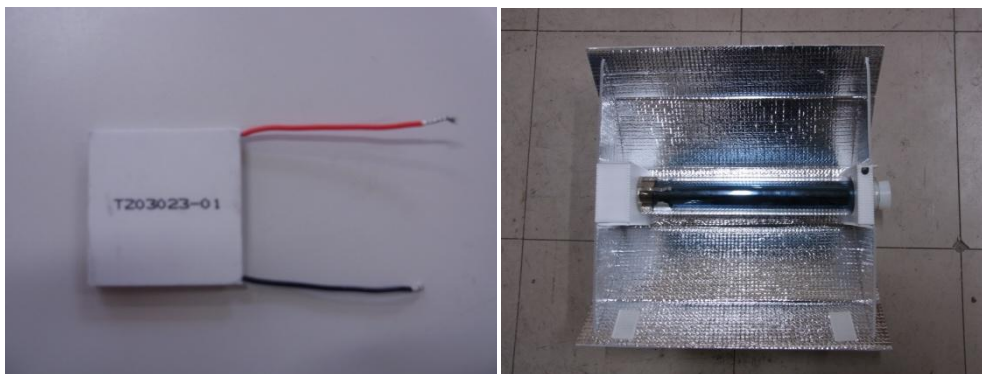


Fig.5 実験に使用した装置（左：ペルチェ素子，右：真空二重管）

4.1. 真空二重管の実験

4.1.1. 真空二重管のみの実験

既製品であるエコ作の真空二重管内部の流体温度を計測するために実験装置を製作した．実験装置を Fig.6 に示す．

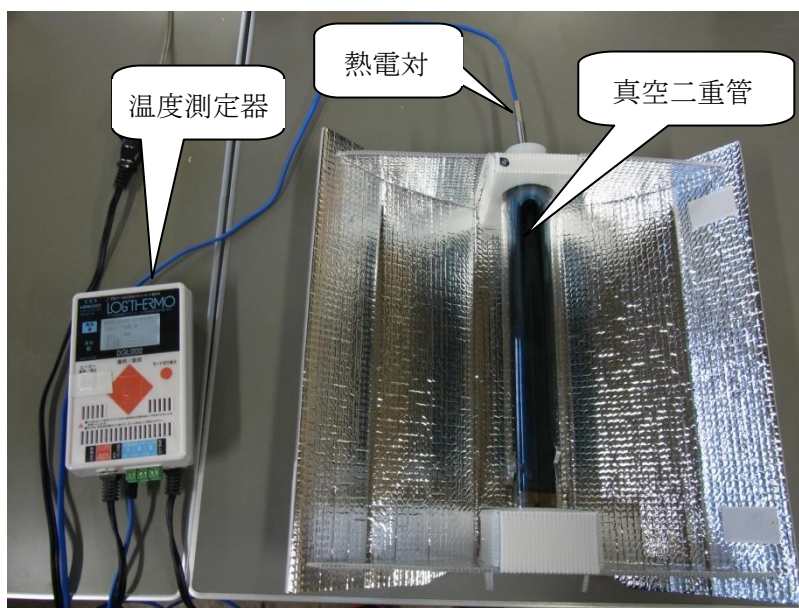


Fig.6 実験装置

(1) 真空二重管内に水を適量入れてゴム栓をし、既存の穴に K 型熱電対を挿入し、温度測定機器（LOGTHERMO DGL0100，株式会社八光電機）に繋げて温度を計測した。

(2) エコ作ごと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。

以上の手順で実験を行った。

4.1.2. 真空二重管とヒートパイプを用いた実験

ゴム栓の穴にヒートパイプを挿入した際のヒートパイプ温度を測定する実験装置を製作した。実験装置を Fig.7 に示す。ヒートパイプに K 型熱電対を貼り付けて温度を測定した。

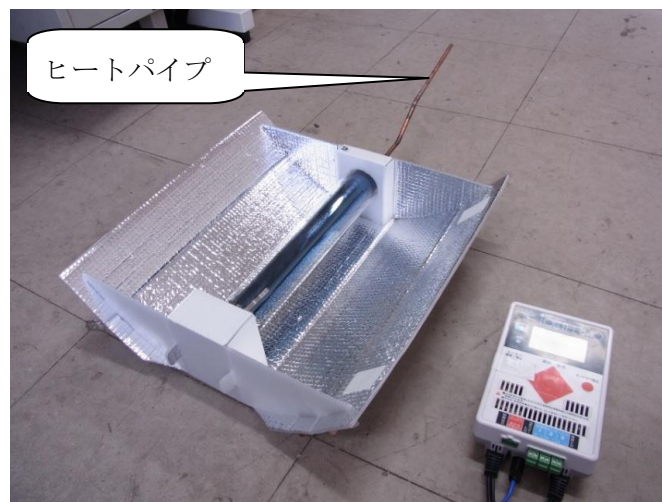


Fig.7 実験装置（ヒートパイプ付）

(1) 同様に真空二重管内に水を入れ、ヒートパイプを挿入したゴム栓で真空二重管に栓をした。

(2) 太陽の当たる場所に任意の時間放置し、温度測定機器にてデータを採取した。

以上の手順で実験を行った。

4.2. ペルチェ素子の実験

微小な温度差から発電するという利点を持つペルチェ素子を熱電変換モジュールとして用いた。ペルチェ素子間に有効な温度差を与えるため、高温側にシリコンラバーヒーターを設置し、低温側にアルミ容器に水を入れた実験装置を製作した。ペルチェ素子の両側に T 型熱電対を各 1 本設置して温度を計測した。Fig.8 に実験装置の写真を示す。また、Fig.9 に実験装置の概略図を示す。

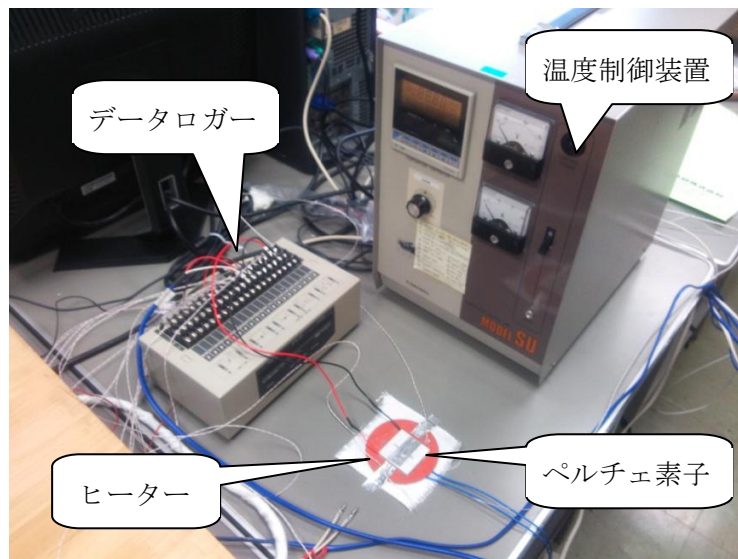


Fig.8 実験装置

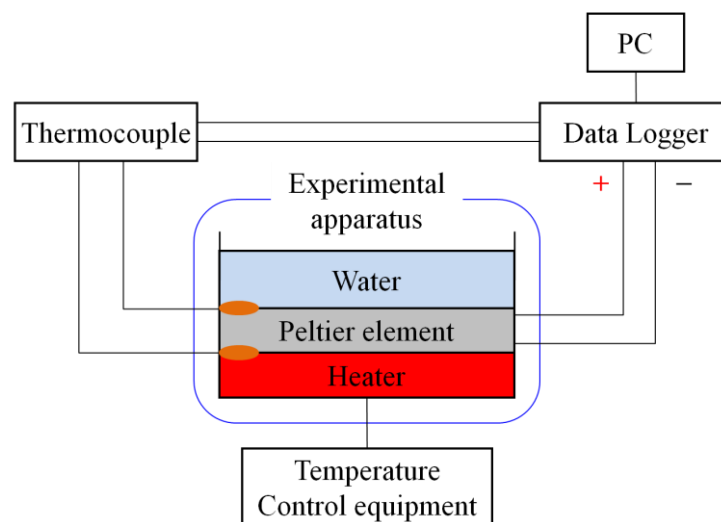


Fig.9 実験装置（概略図）

- (1) ペルチェ素子の高温側をヒーターで加熱し、低温側はアルミ容器に入れた水で冷却を行った。
 - (2) 電圧、ペルチェ素子の両側の温度を 1 時間計測した。
- 以上の手順で実験を行った。

5. 実験結果

5.1.1. 真空二重管のみの実験

既製品であるエコ作の真空二重管内部の流体の温度を計測する実験を行った。実験結果を Fig.10, Fig.11 に示す。

Fig.10 は、真空二重管内部にごく少量の水を入れゴム栓をして行った実験の結果である。実験は、2012 年 8 月 29 日に行った。夏季であるため水道水の温度が高く、実験開始時の真空二重管内部の温度は、約 30℃ であった。実験開始後約 1 時間で真空二重管内の流体の温度は、100℃ を超える結果となった。内部流体のほとんどが気体であるため、真空二重管内の温度は、約 2 時間後に 250℃ 付近まで上昇し、200℃ 前後の温度を維持する結果となった。約 3 時間後温度の値が急激に低下しているのは、真空二重管内の圧力が高くなり、ゴム栓が真空二重管から外れたことによる外気侵入の影響である。

Fig.11 は、真空二重管内部を水で満たしゴム栓をして行った実験の結果である。実験は、2012 年 8 月 30 日に行った。内部流体が気体と少量の水の条件と同様に実験開始時の真空二重管内部の温度は、約 30℃ であった。実験開始後約 1 時間で真空二重管内の水の温度は 100℃ に達した。その後 1 時間程 100℃ を維持し、前述の実験と同様にゴム栓が外れ温度が低下する結果となった。

以上の 2 つの条件で実験を行った結果、真空二重管内部には水と空気を混在させて加熱を行った方が真空二重管内の温度が高くなることが分かった。この結果から以降の実験は、真空二重管内には、水と空気を混在させて行うこととした。

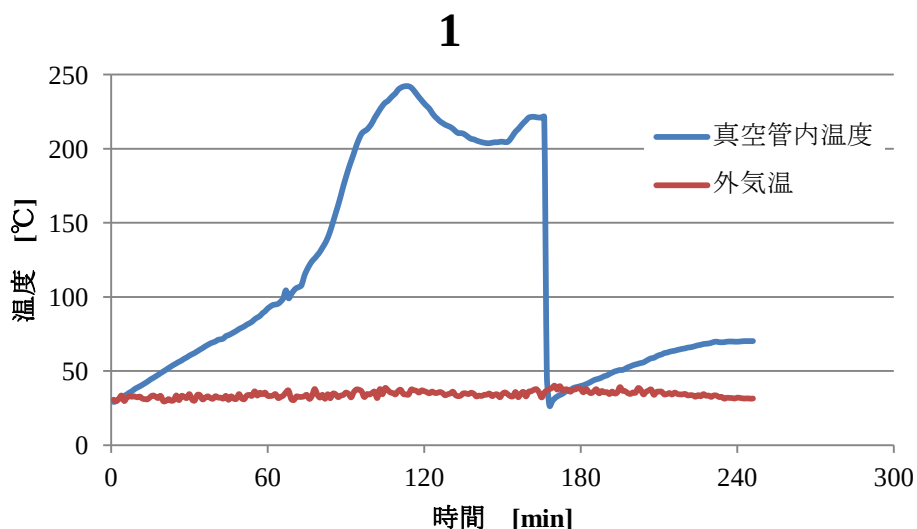


Fig.10 実験結果（内部流体：空気＋水）

2

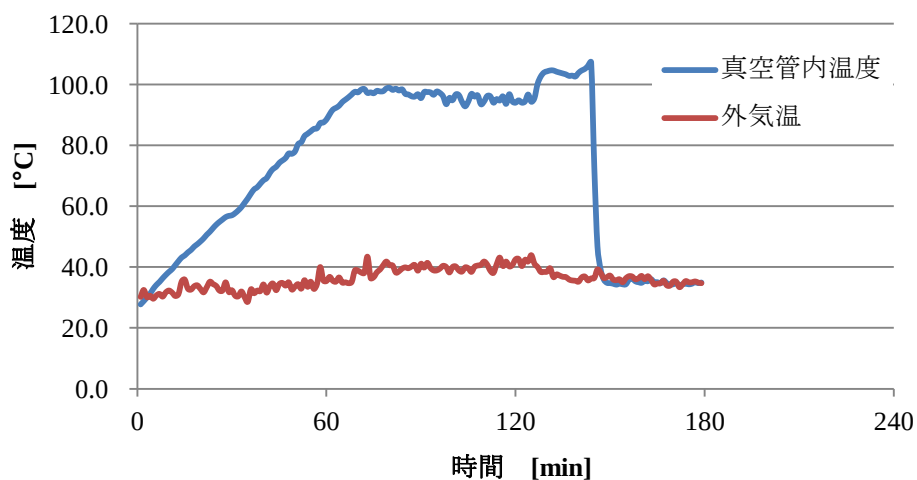


Fig.11 実験結果（内部流体：水）

5.1.2. 真空二重管とヒートパイプを用いた実験

5.1.1.で行った実験結果を踏まえてゴム栓に銅製のヒートパイプを挿入し，ヒートパイプの温度を計測する実験を行った．値に変動はあるものの時間経過とともに徐々にヒートパイプの温度は上昇している．2時間程度太陽の当たる場所に放置しておけば約 70°C 程度の温熱を取り出せることが分かった．この温熱をペルチェ素子の加熱側へと輸送し，熱電発電を行うことにした．また，この実験も 2 時間を超えると真空二重管内の圧力が高まりゴム栓が外れ，温度が急激に低下した．

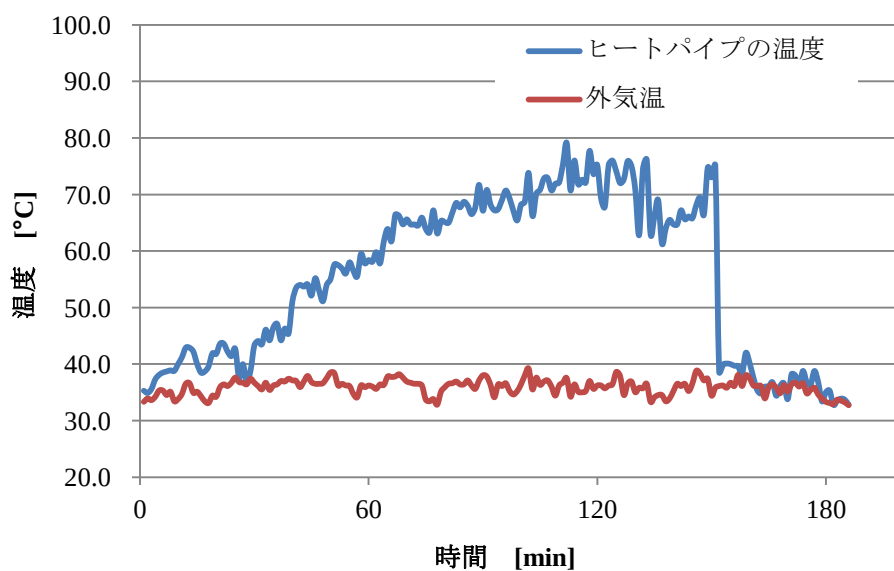


Fig.12 ヒートパイプの温度変動

真空二重管に備え付けのゴム栓の穴にヒートパイプ及び K 型熱電対を挿入して実験を行った際に、時間経過とともに真空二重管内の圧力が上昇してしまいゴム栓が徐々に外れてきてしまう現象が発生した。この問題を解決するために、ゴム栓に直径 1mm 程度の小さな穴を開け圧力の上昇を抑制することにした。このゴム栓を使用した場合の実験では、圧力の上昇を抑えることができ、ゴム栓が外れて温度が低下することは無かった。これより、おもちゃの船を製作する際にもこのゴム栓を使用することとした。

5.2. ペルチェ素子の実験

ペルチェ素子 1 枚に温度差を付けた場合にどの程度発電するかを調べた。真空二重管の実験結果を踏まえて、ヒーターの温度を 50°C から 70°C まで 5°C 間隔で変化させた実験を行った。また、本実験は無負荷の条件下で行った。以下に各条件の実験結果を示す。

以下に示す実験結果は、ペルチェ素子の加熱側と冷却側の温度差と発電電圧との関係を表したグラフである。Fig.13 から Fig.17 の実験結果において、電圧は温度差と比例関係にあることが分かる。

また、真空二重管及びヒートパイプを用いた実験において、ヒートパイプの一端から約 70°C の温熱を取り出すことが出来たため、ヒーターの設定温度が 70°C の場合の実験結果に着目した。この条件では、温度差が約 10.3°C の時、約 443mV 程度の発電電圧を確認した。

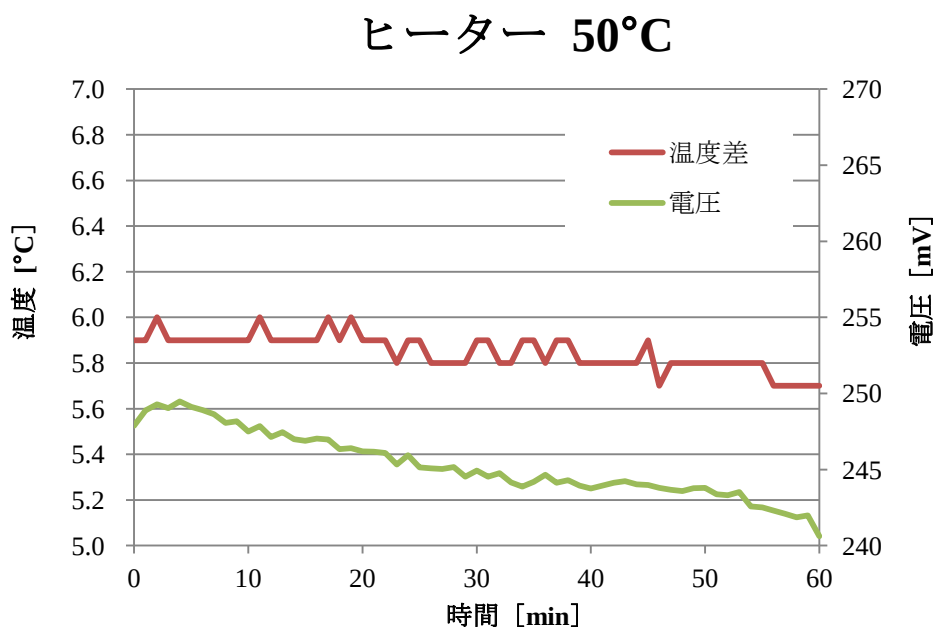


Fig.13 ヒーター50°C

ヒーター 55°C

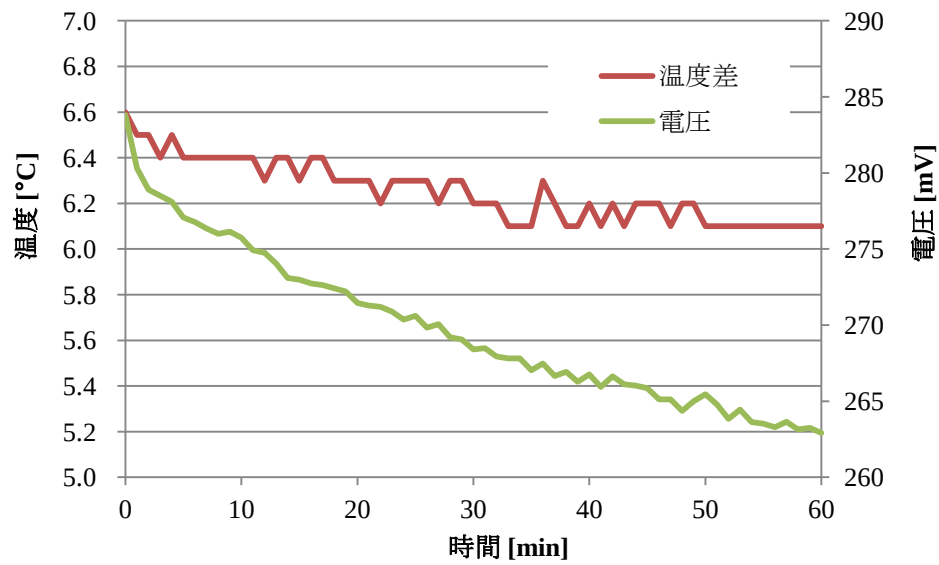


Fig.14 ヒーター55°C

ヒーター 60°C

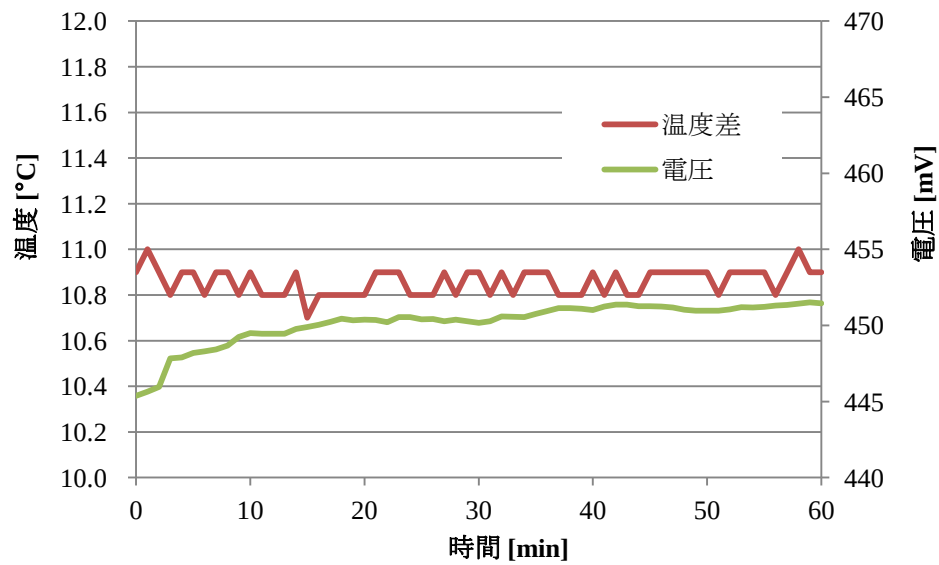


Fig.15 ヒーター60°C

ヒーター 65°C

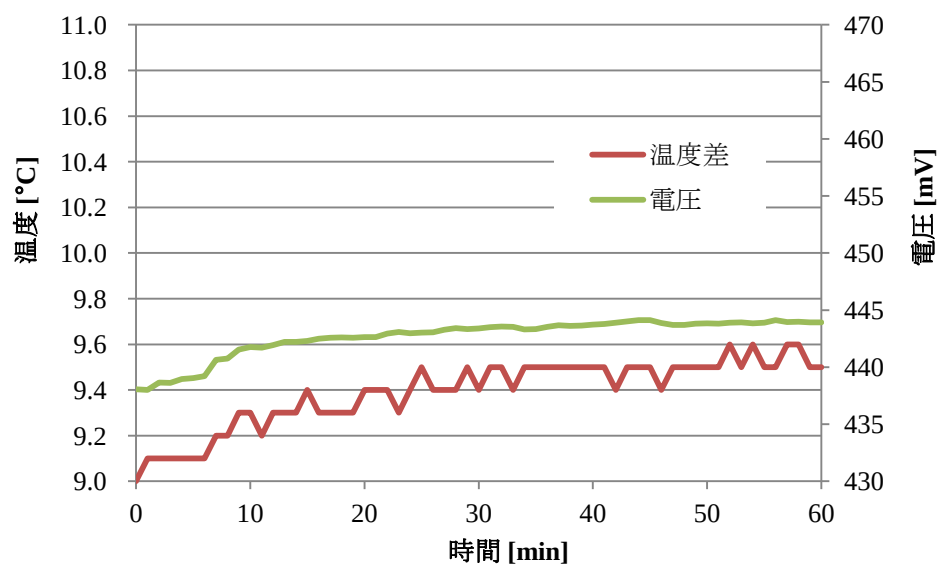


Fig.16 ヒーター65°C

ヒーター 70°C

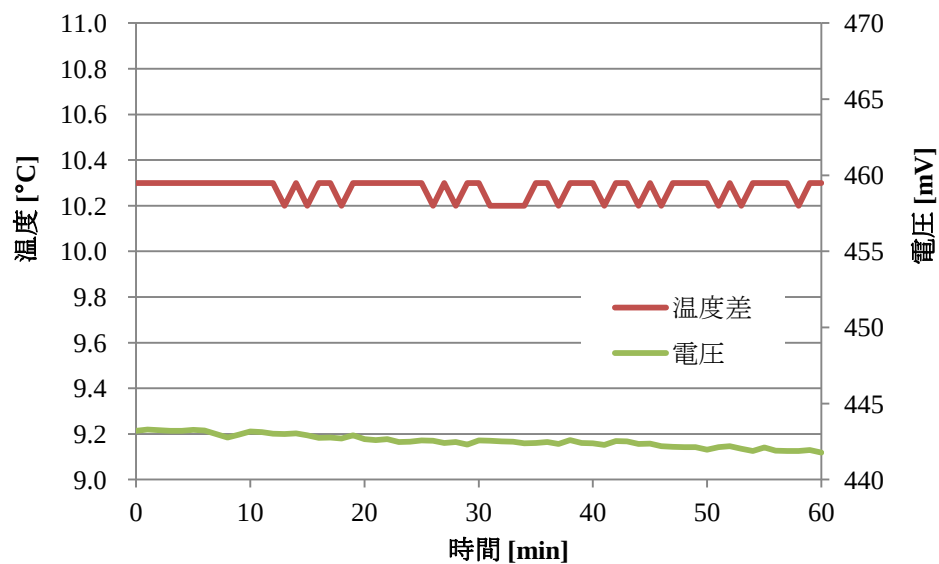


Fig.17 ヒーター70°C

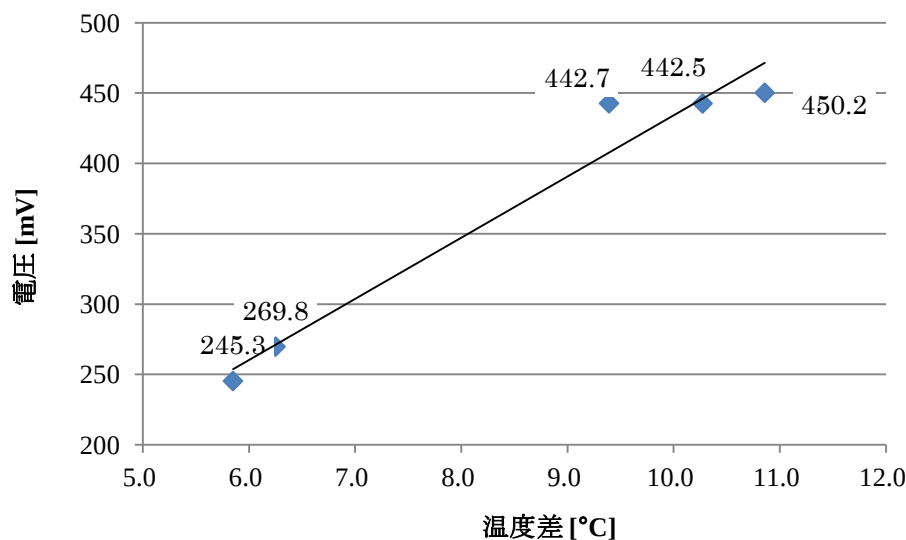


Fig.18 温度差と電圧の関係

Fig.18 は、x 軸に各条件の温度差の平均値をとり、y 軸に各条件の電圧の平均値をとってその関係を示したグラフである。ペルチェ素子に約 10°C の温度差を与えた場合、約 440mV の電圧を獲得することが出来た。この実験結果を踏まえて自発的に駆動するおもちゃの船の主要部であるペルチェ素子の枚数、加熱部及び冷却部の構造、材料を検討した。

6. おもちゃの製作

基礎実験を踏まえてペルチェ素子を複数枚用いて、市販の船外モーター（マーキュリー船外機 A タイプ）が駆動するペルチェ素子の枚数、温度差を検討した。検討した結果を基に太陽熱により自ら発電して動く、おもちゃの船を製作することとした。

6.1. 加熱側が銅板、冷却側が銅板の組み合わせ（ペルチェ素子 3 枚）

今回の目標であるモーターを動かすための電力を得るために、ペルチェ素子に真空管内部から効率良く熱を伝え、また冷却水により冷やす工夫が必要である。そこで、銅は熱伝導率が $398\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であり、金属の中でも熱伝導率が高いことから銅板を使用した。加熱側では真空管からヒートパイプで熱を伝える際に、厚さ 2mm の銅板をサーモセメントでヒートパイプと接着した。また、同様に冷却側にも厚さ 2mm の銅板をサーモセメントでヒートパイプと接着した。Fig.19 に示すように、接着した 2 枚の銅板で 3 枚のペルチェ素子を挟むことで加熱と冷却を行った。この実験装置において、加熱側を 100°C の沸騰水、冷却側を 25°C の水道水で実験を行い、約 0.8V の発電を確認した。これはヒートパイプの温度が約 60°C で、加熱側と冷却側とで熱の伝達が効率良く出来ていなかったものと考えられる。また、ペルチェ素子に 1.5V 程度で動く市販の船外モーターを接続すると、発電量が足りなかったためモーターが動作しないことを確認した。

この装置での問題点について考察を行った．まず，厚さ 2mm の銅板では厚すぎるため，熱伝導に対する抵抗が大きいことが考えられる．また，3 枚ペルチェ素子では枚数が少なかったため発電量が足りなかったと考えられる．この 2 点の問題点を踏まえて改良を行った．

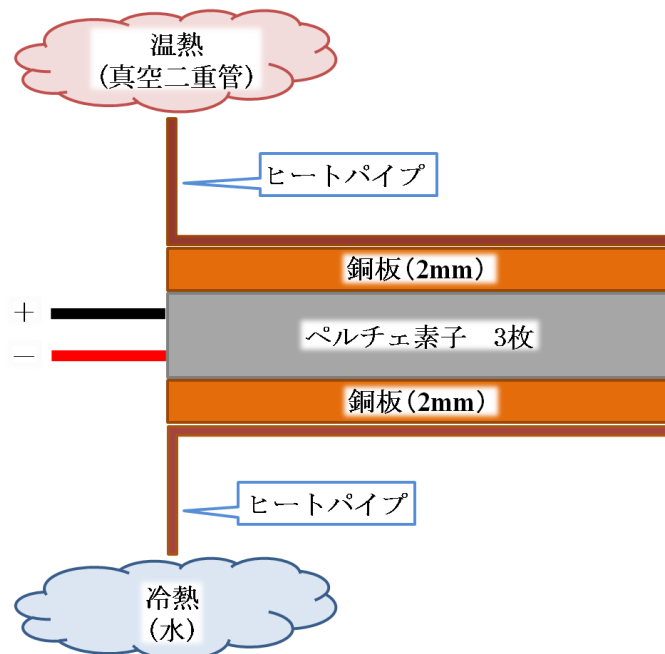


Fig.19 実験装置（銅板：2mm，ペルチェ素子：3 枚）

6.2. 加熱側をアルミ板，冷却側をアルミ板の組み合わせ（ペルチェ素子 12 枚）

加熱側，冷却側に銅板を使用した際の問題点を踏まえ，Fig.20 のような加熱側を厚さ 1mm のアルミ板，同様に冷却側にも厚さ 1mm のアルミ板を使用した実験装置を製作した．アルミニウムの熱伝導率は $237\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であり，銅よりも低い十分な熱伝導が期待できると考え，銅より 1mm 薄いものを使用した．さらに，水道水からヒートパイプを使ってアルミ板を冷却するよりも，アルミ板を水道水に直接触れさせた方が伝熱面積を広げることができるため，アルミ板を水道水に直接触れるように設置した．また，ペルチェ素子の枚数を 3 枚から 12 枚に増やすことで発電量を増加させた．実験条件は，加熱側を 100°C の沸騰水，冷却側を 20°C の冷水で実験を行った．今回，実験した時期が夏季であったため，水道水では水温が高かったため，氷を入れて 20°C 程度に調節した．水温を下げることで，ペルチェ素子の温度差を大きくすることができ，この条件で実験を行った場合に約 1.0V の発電を確認した．

厚さ 2mm の銅板の時の実験と比べ，ペルチェ素子の枚数が 4 倍に増えたにも関わらず 1.0V しか発電できなかった原因について考察を行った．まず，12 枚のペルチェ素子に対して，アルミ板がペルチェ素子 12 枚分と同じ大きさであったため，端の方ではペルチェ素子とアルミ板との密着性が低く，隙間が生じていたことにより，ペルチェ素子の加熱と冷却がうまくできていなかったと考えられる．さらに，アルミ板の大きさが縦 16cm×横 12cm で

あり，ヒートパイプにより輸送できる熱エネルギーに対してアルミ板の面積が大きすぎたため，アルミ板全体の温度をあまり上昇させることができていなかったと考えられる．また，Fig.21 に示すように，ヒートパイプとアルミ板が接着している箇所は，アルミ板の中央のみであることから，中央に設置された 6 枚のペルチェ素子以外は，ヒートパイプによる加熱が十分でなかったものと考えられる．加えて，枚数を増加させたことにより各ペルチェ素子間での接続面積が増大し，電気的な抵抗も増大して，有効な発電量が得られなかったものと考えられる．以上の問題点を踏まえてさらなる改良を行った．

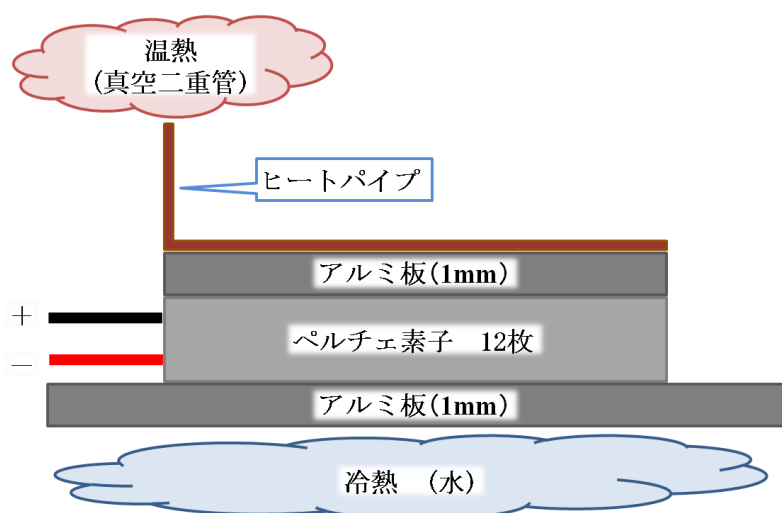


Fig.20 実験装置（アルミ板：1mm，ペルチェ素子：12 枚）

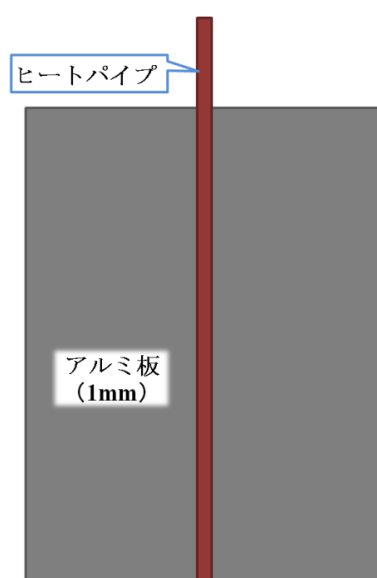


Fig.21 実験装置（加熱部）

6.3. 加熱側をアルミ板、冷却側をアルミ板の組み合わせ（ペルチェ素子 6 枚）

アルミ板での実験における考察の妥当性を検証するため、ペルチェ素子の枚数のみ 6 枚に変更し、アルミ板の中央のみに設置した。実験条件は先程と同様に、加熱側を 100°C の沸騰水、冷却側を 20°C の冷水で実験を行った。この条件で実験を行った場合は約 1.2V の発電を確認した。また、少ない電力でもトルクフルな回転を生み出し、軽いものをゆっくり動かし続ける工作に適した市販のモーター（tamiya solar motor 02）を接続してみると、回転数は低いものの僅かながら回転することを確認した。モーターの規格を Table1 に示す。6 枚の時と 12 枚の時を比べて発電量が増大しているのは、ペルチェ素子とアルミ板の密着性を上げるために、圧力を加えたためである。

この実験結果より、12 枚の時の両端のペルチェ素子は、ほぼ発電してなかったと考えられる。また厚さ 1mm のアルミ板と、厚さ 2mm の銅板ではあまり発電量に差がみられなかったため、薄い銅板を使用することで熱伝導率が向上する可能性があることがわかった。また、ペルチェ素子の枚数は、ヒートパイプが当たる中央のみに設置できる程度の枚数で十分であることがわかった。そこで次の改良を行った。

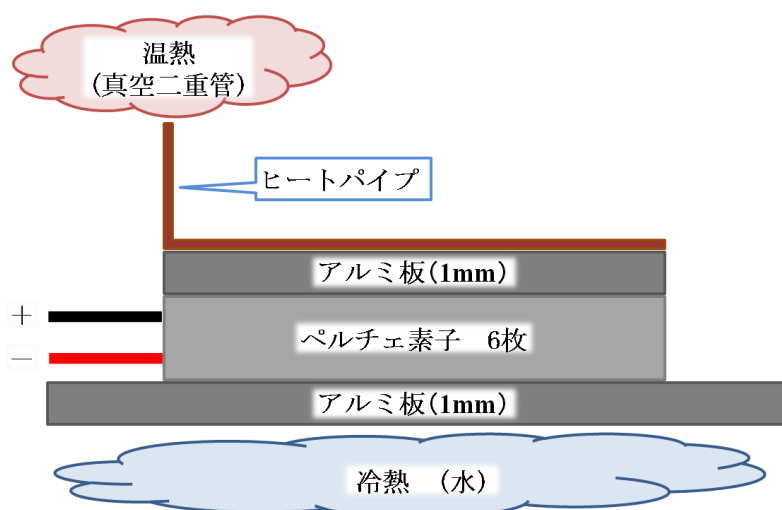


Fig.22 実験装置（アルミ板：1mm，ペルチェ素子：6 枚）

Table1 モーター（tamiya solar motor 02）の規格表

使用電圧 0.4V~1.5V

電圧[V]	電流[A]	回転数[rpm]
0.5	0.025	380
1.5	0.03	1280

6.4. 加熱側が銅板、冷却側が銅板の組み合わせ（ペルチェ素子 4 枚）

今までの実験における問題点を踏まえて Fig.23 のような加熱側を厚さ 0.5mm の銅板、同様に冷却側にも厚さ 0.5mm の銅板を使用した実験装置を製作した。また、ペルチェ素子の枚数は 4 枚に変更し、ペルチェ素子の真上にヒートパイプがくるように設置した。実験条件は先程と同様に、加熱側を 100℃ の沸騰水、冷却側を 20℃ の冷水で実験を行った。この条件で実験を行った場合に約 2.5V の発電を確認した。また、0.5V 程度で動くモーター（tamiya solar motor 02）を接続してみると、アルミ板の時よりも回転数が高いことを確認した。熱伝導率の高い銅板を薄くして、枚数を最小限にしたことにより、これまでで最も良好に発電する結果を得た。

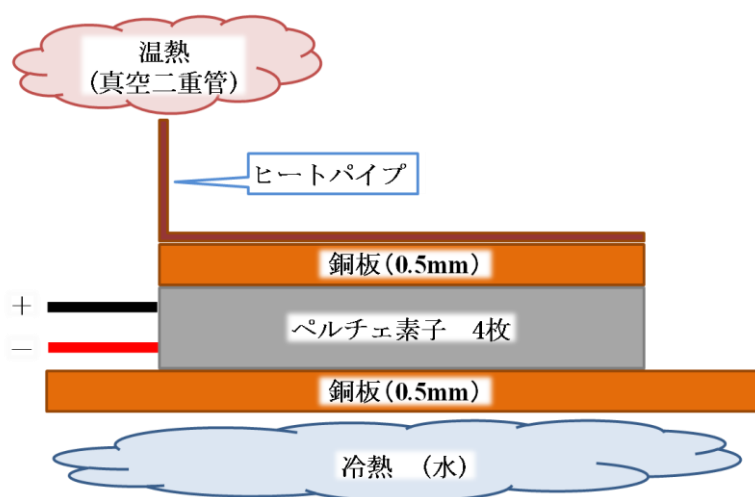


Fig.23 実験装置（銅板：0.5mm，ペルチェ素子：4 枚）

加熱側及び冷却側の素材を変化させて発電電圧を比較した結果を Table2 に示す。結果から加熱側及び冷却側の素材を銅板 (0.5mm) にした場合が最も発電電圧が高いことが分かる。以上から製作するおもちゃの船のペルチェ素子の枚数を 4 枚とし、加熱側及び冷却側の素材には 0.5mm の銅板を用いることとした。

Table2 各条件における発電電圧

加熱側，冷却側の素材	ペルチェ素子の枚数	発電電圧[V]
銅板 (2mm)	3	0.80
アルミ板 (1mm)	12	1.0
アルミ板 (1mm)	6	1.2
銅板 (0.5mm)	4	2.5

6.5. おもちゃの船を動かす

この実験装置を利用した Fig.24 の概略図に示すようなおもちゃの船を製作した。船のボディは発泡スチロールで製作し、船底に冷却側の銅板が水面と接するように穴をあけ、ペルチェ素子が常に冷却されるように銅板を設置した。また、船の前方にスクリューを設置し、まっすぐ進むように、スクリューの前方に簡易的なフィンを設置した。常に太陽熱を受けられるように、船上に真空管を設置した。また、ヒートパイプから大気中への放熱を防ぐために、ヒートパイプ及び銅板にスプレー式の断熱材を吹き付けた。製作した船の写真を Fig.25 に示す。このおもちゃの船を、山梨大学キャンパス内にある池に浮かべてみると、実際に発電し、スクリューが回転して、船が前進することを確認した。しかしながら、船の側面が僅かな風の影響をも受けてしまうほどの空気抵抗があるため、十分な推進力を確認することができなかった。そこで、船の側面を取り除き、空気抵抗を軽減した船底のみの船を製作した。この場合はさらに推進力を得ることができた。また、最終目標であった発電した電力を、蓄電装置に蓄電させて、ふく射による熱エネルギーを獲得しにくい日でもモーターが動くようなシステムは、発電電圧が微小であったことから製作することはできなかった。しかしながら、当初の目的であった太陽熱により駆動するおもちゃの船は製作することができた。実際に製作した船の写真を Fig.26 に示す。

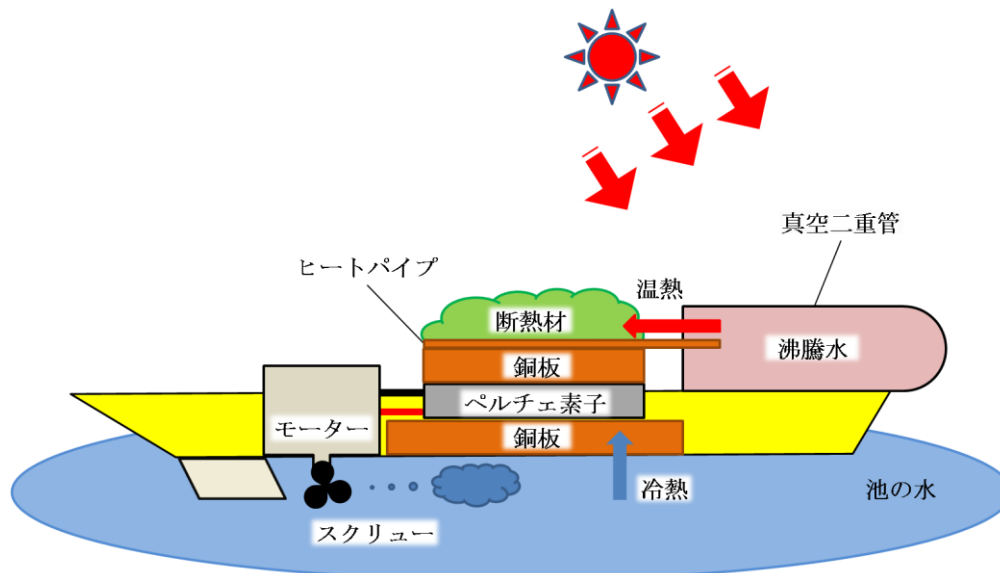


Fig.24 船の完成図

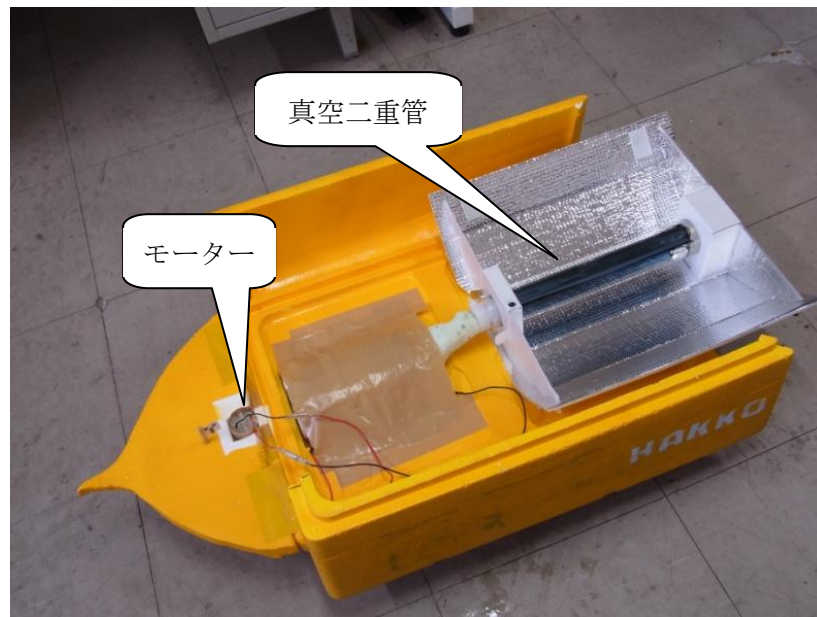


Fig.25 製作した船の写真（原案）



Fig.26 製作した船の写真（改良型）

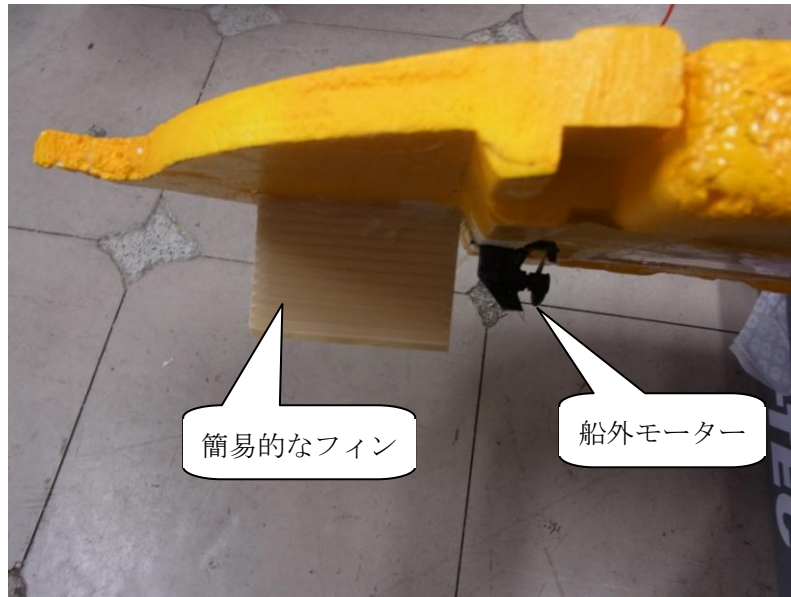


Fig.27 船の駆動部

6.6. 撮影動画

実際に製作した船が駆動している動画を撮影した．山梨大学キャンパス内にある池を冷却水に利用し，発電して船を動かした．駆動開始後は順調に動いていたが，池の中央にある水の吸い込み口に向かって流れる水流が存在していたため動画の後半は池の中央部に吸い込まれるように流れていってしまった．この水流に逆らうほどの推進力は得ることはできなかった．

撮影動画を別途転載してあります．

7. まとめ

今回，真空二重管とヒートパイプを用いて，効率良く熱エネルギーを回収し，回収した熱エネルギーを熱源としてペルチェ素子を用いて熱電発電を行う実験を行った．まとめとして実験の目的で立てた3つの目標と比較しながらまとめていきたい．

- (1) 真空二重管内の熱エネルギーを効率よく取り出し，温度差をできるだけ大きくするシステムの製作！

市販の真空二重管（エコ作）を利用することで，簡単に太陽の輻射による熱エネルギーを効率よく回収することが出来た．さらに銅製のヒートパイプ及び銅板，サーモセメントを利用することで温度の低下を最小限に抑え，ペルチェ素子に伝えることが出来た．これによりペルチェ素子に有効な温度差を与えることが可能となり，より高い電圧を獲得することが出来た．目標である真空二重管の熱エネルギーを効率よく取り出し，温度差を大きくするシステムを構築することが出来たと言える．

(2) モーターが動く程度の発電量を得る！

市販の船外モーターを動かすために単純にペルチェ素子を増やし、実験を行ったが 1V 程度しか発電せずモーターを回すことが出来なかった。ペルチェ素子の加熱側及び冷却側の素材を検討することでより高い電圧を得られる結果となった。加熱側及び冷却側の素材を薄い銅板にすることで、真空二重管内の 100°C の沸騰水と約 20°C の水道水の温度差で約 2.5V の電圧を獲得することが出来た。また、低電圧で駆動するモーターを船外モーターに組み込むことで船外モーターにつながっているスクリューを動かすことに成功した。目標は、100%達成できたと言える。

(3) 蓄電装置に電気を蓄えて、天気の良い日でも動くような装置の製作！

獲得できた電圧が約 2.5V と低く、さらに安定的に発電出来なかった。それ故、蓄電実験を行うことが出来なかった。そのため、蓄電装置を備えた天気の良い日でも駆動するような装置及びおもちゃを製作することが出来なかった。しかし、天気の良い日限定で駆動するシステム及びおもちゃは製作することが出来た。今後、現在のシステムに改良を加えていけば蓄電装置を備えたシステムを構築することが出来ると考える。

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は、感謝致します。