

小さな熱源も見逃さない！水に浮かべるだけの船

所属先 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

代表者指名 遠藤 卓也
天野 慎也 浅利 悠太
繁松 拓未 青山 敬紀

1. 諸言

近年、化石燃料枯渇の懸念から自然エネルギーを有効に利用する技術の研究開発が進められている。しかしながら、特に自然の熱エネルギーを利用することは経済的な観点からも容易ではない。ここでは、直接利用できる川や池などの水温と外気温との温度差が生み出す熱エネルギーに着目した。一般に自然の熱エネルギーは比較的低温であり、利用できる温度差も小さいことから動力エネルギーとして利用することは困難である。そこで、低温かつ小さい温度差で作動する形状記憶合金を用いた熱エネルギーの利用法を検討した。形状記憶合金は、ある温度を超えると記憶された元の形状に戻る性質を持つため、この時の力を動力に利用できるのではないかと考えた。本提案では形状記憶合金を用いて、水温と外気温の熱エネルギーを動力に変換する装置を製作し、実証実験を行った。

2. 原理及び実験装置

2.1 形状記憶合金の特性

形状記憶合金とは、各々の合金の固有な値である変態温度(A_f 点)以下の温度で変形させても、それを超えるとあらかじめ記憶させておいた形状に戻る特性を持つ合金である。この時、元に戻ろうとする力は変形に要した力の3倍程度であるとされている。さらに、 A_f 点以上の温度では変形してもすぐに元の形状に戻る性質を持ち、この弾性変形の範囲は鋼などを使う通常のスプリング等に比べてはるかに広い。この性質を超弾性といい、特に A_f 点が常温以下の合金のことを超弾性合金と呼ぶ場合がある。形状記憶合金は、一般的にニッケルとチタンを主成分とするもので、組成や熱処理の仕方を変更することで任意の A_f 点を持たせることが可能である。

2.2 実験装置

水温と外気温の温度差を利用して、形状を記憶した形状記憶合金を伸縮させることで、動力を得る。例えば、Fig.1のように平面に対して垂直に2枚の回転円板を設置し、複数の形状記憶合金（コイル状に形状記憶したもの）で繋ぐことにより、形状記憶合金が伸縮するときに2枚の回転円盤が回転する。この時Fig.2のように2枚の回転円板を、上空から見るとハの字型になるように設置しておくことで、形状記憶合金同士の接触を避ける。

この機構を水面に浮かべた場合、外気温が合金の A_f 点以上のときに水面より上のバネは

元に戻ろうとして収縮する。水中内の合金は A_f 点に達していないので収縮する力が弱くなる。この時、回転円板が回転し、温められたバネは水中に、冷えていたばねは大気中に移動する。(Fig.3)このサイクルを繰り返すことで 2 枚の回転円板が回転を続け動力を得る。逆に外気温が低温側、水温が高温側とした場合には、円盤の回転方向が逆になる動力を得ることができる。(Fig.4)

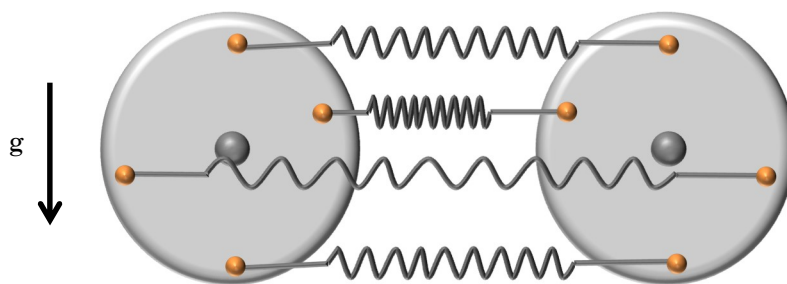


Fig.1 実験装置(正面)

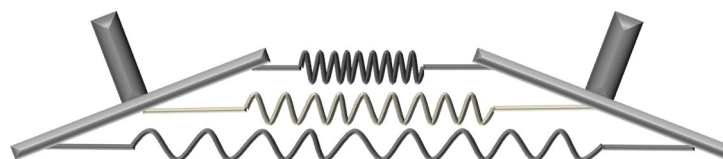


Fig.2 実験装置(上面)

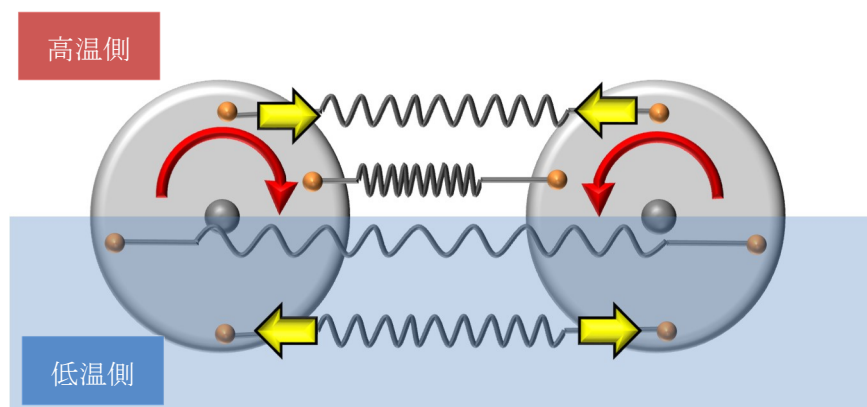


Fig.3 実験装置(高温側：外気温 低温側：水温)

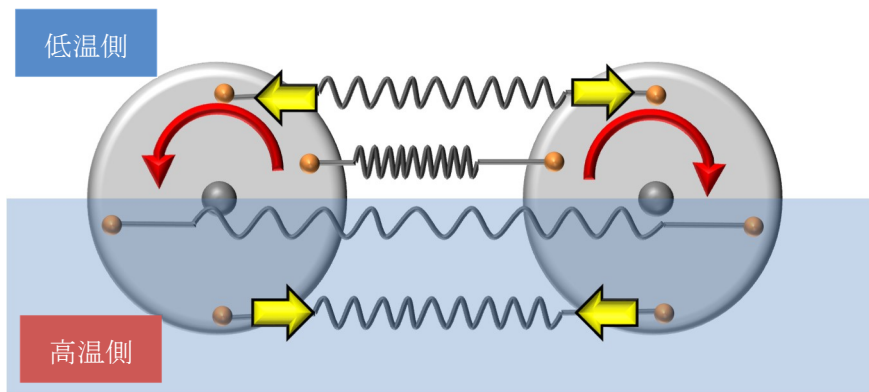


Fig.4 実験装置（高温側：水温 低温側：外気温）

3. 実験目的

本提案では水温と外気温の温度差を利用し，形状を記憶した形状記憶合金を作動させ，それを動力とした船を作成し，実際に駆動させることとした。

船を駆動させるために，実験は，以下の手順で進めた。

- (1) 未記憶の形状記憶合金への形状記憶の方法を検討する。
- (2) 形状記憶合金の最適な形状を検討する。
- (3) 水温と外気温との温度差のみで作動する形状記憶合金を選定する。
- (4) 春季，秋季に駆動可能な船を制作する。
- (5) 夏季に駆動可能な船を制作する。
- (6) 冬季に駆動可能な船を制作する

4. 形状記憶合金の選定

船の動力に適した形状記憶合金の選定を行うため，さまざまな形状や変態温度（ A_f 点）の形状記憶合金を大量に用意する必要がある。しかしながら，一般に販売されている形状記憶合金のものは非常に高価であり，大量に購入し実験を行うことができない。また，特注品以外の取扱品はさほど種類が多くないため，本実験装置に適した形状記憶合金を選定するのは困難である。そこで，(株)吉見製作所が販売を行っている比較的安価な未記憶状態の形状記憶合金を購入し，形状を記憶させることにした。

本研究では，合金の熱処理，形状， A_f 点について実験的手法により評価を行い，船に適した形状記憶合金の選定を行った。熱処理については同社の「記憶マン」という形状記憶学習キットの熱処理方法を参考にした。

4.1. 熱処理の方法

4.1.1. ろうそくを使用した場合

まずは一般家庭にもあるような身近な物で熱処理ができないか検討した。本研究では、1本 1.8g のろうそくを 3 本使って熱処理を行った。加熱時間は 15 分とし、水につけて急冷する。その時の実験風景を Fig.5 に示す。

実験の結果、加熱した 3 点のみ形状が記憶され、合金全体に形状を記憶させることはできなかった。また、形状を変形させて回復させるサイクルを行った結果、3 回目あたりから形状が回復しなくなった。原因として、1 つはろうそくの炎の最高温度は約 700~800°C と十分に高いが、高温部の領域が非常に狭いことが考えられる。

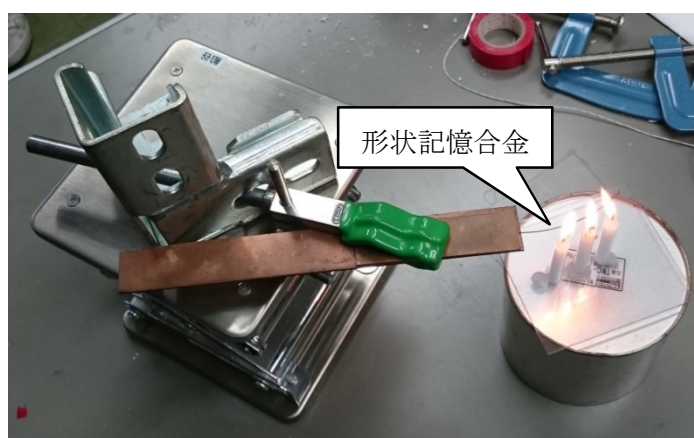


Fig.5 ろうそくによる熱処理

4.1.2. ライターを使用した場合

ろうそくと同様に身近な物であり、安定して熱量を与えることのできるライターでの実験を行った。ろうそくの時と同様に形状記憶合金を固定し、ライターを動かしながら全体を加熱した。ろうそくの時と同様に加熱時間は 15 分とし、水につけて急冷した。その時の実験風景を Fig.6 に示す。

ライターを動かしながら加熱したため、ろうそくのように局所的に形状が記憶されることはなかった。しかしながら、こちらも何度か形状回復を試みると、徐々に形状を回復できなくなった。炎による直接加熱は、温度むらが激しく、均一に加熱して保持することが困難であり、温度条件が重要な熱処理では適していないと考えられる。



Fig.6 ライターによる熱処理

4.1.3. オープントースターを使用した場合

ろうそくやライターなどの燃焼熱では局所的に加熱するため、形状記憶合金を均一に加熱することが非常に困難であった。そこで赤外線で加熱を行う電気式のオープントースターで実験を行った。しかしながら、最大出力としても温度は約 200~300℃までしか上昇しなかったため形状記憶処理を行うことはできなかった。

4.1.4. 電気炉

最後に形状記憶合金を取り扱っている企業が実際に利用している熱処理方法である電気炉を利用した。温度や加熱時間の調整も簡単であるので形状記憶処理には最も適している。熱処理の方法は記憶させたい形状で合金を固定し 1 時間 500℃の電気炉で加熱しその後 1 時間冷却を行い、形状を記憶させた。

形状を記憶させるためには記憶させたい形状で合金を固定しなければならない。複雑な形状になるほど固定することが困難となる。まずは、簡単な直線記憶で熱処理の可否の確認を行った。Fig.8 のようにナットとナットで形状記憶合金を挟んで固定した。熱処理が完了すると直線状の形状が記憶されており、折り曲げても Af 点を超えると元に戻った。何度変形を繰り返しても Af 点以上の温度にすればすぐに記憶された形状に戻った。

以上の結果より、本研究では形状記憶合金の熱処理として電気炉(日陶科学株式会社：NHK-120H)を用いることとした。



Fig.7 電気炉(日陶株式会社 : NHK-120K)



Fig.8 直線記憶した形状記憶合金

4.2. 記憶形状について

4.2.1. U字型記憶

直線記憶の成功を確認した後、実際に船の駆動力として機能する形状について検討を行った。U字型に形状を記憶させると、 A_f 点以下では簡単に伸ばすことができ、 A_f 点以上になればU字型に戻ろうとして引っ張る力が発生する。この力の差が駆動部の回転力となる。

(Fig.9) また、U字記憶は直線記憶のように簡単に作成できる点について優れており、Fig.10のように固定して熱処理を行った。形状を記憶させた後、簡易的ではあるが実際に円盤に取り付け駆動の確認を行った。複数取り付けた場合に他の形状記憶合金と干渉してしまう点や、Fig.9に示すようにある時刻において水に浸かっている合金が多すぎる点が問題となったため、別の形状を検討した。

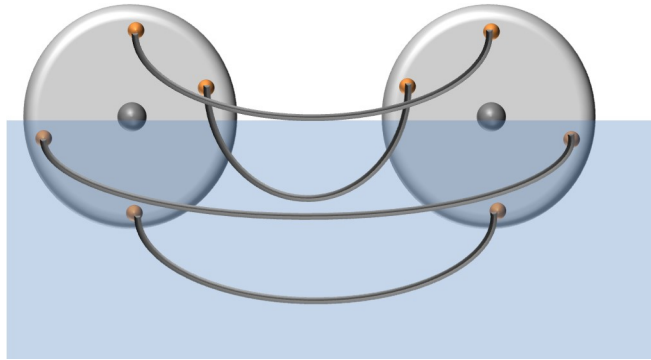


Fig.9 U字記憶の形状記憶合金を用いた場合

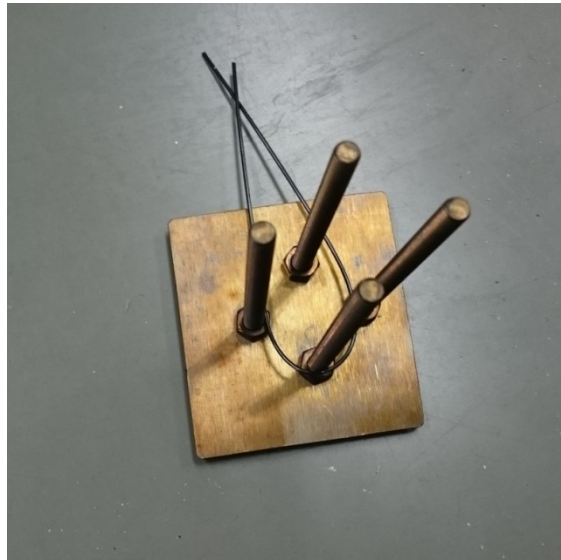


Fig.10 U字に固定した形状記憶合金

4.2.2. 波状記憶

U字記憶で問題となった他の形状記憶合金との干渉を解決するために、波状記憶とする実験を行った。U字型に比べて作動時の動きがコンパクトになるため、他の形状記憶合金との干渉を多少なりとも抑えることができると考えた。Fig.11, Fig.12 のように固定して熱処理を行った。

合金同士の干渉は無くなったが、実際に駆動させようとしたところ適切に作動しなかった。原因として、駆動部の円盤を引っ張る力が不足していることや、合金1本1本の力にむらがあったことが考えられる。そこで、加工は格段に難しくなるがコイル状に記憶させることを検討した。



Fig.11 波状に固定した形状記憶合金(山が 2 つの場合)



Fig.12 波状に固定した形状記憶合金(山が 4 つの場合)

4.2.3. コイル状記憶

コイル状に形状記憶させることで、引っ張り力の増加、及び形状記憶時のむらの軽減を図ることができた。また、全体が伸縮部分であるため動力の伝達ロスも少なくなる。制作方法は金属の板に等間隔で溝を掘り、そこに合金を巻いて固定した。実際に固定している状態のものを Fig.13 に示す。

模擬装置で実際に動かしてみると、引っ張る力は強く、また他の合金とも全く干渉せず作動することを確認した。以上の結果から本実験ではコイル状に記憶した形状記憶合金を駆動部に利用することとした。

コイルの仕様は自然長：120 mm，コイル径：10 mmとした。



Fig.13 コイル状に固定した形状記憶合金

4.3. Af 点について

4.3.1 Af 点の比較

山梨県甲府市における夏季の日中外気温は、約 35～40 度近くまで上昇する。一方、冬季は大きく冷え込み、10 度以下まで下降する。このように季節による気温差があるため、1 年を通して駆動できる船の駆動部に用いる形状記憶合金の選定は、Af 点が非常に重要となる。そのため、最初に Af 点の検討を行った。まず、コイル状に形状を記憶した合金を冷水で冷却し Fig.14 のように伸ばした状態にする。その状態で適当なお湯につけ収縮するかを目視で確認する。その結果を Table1 に示す。温度計測には株式会社八光電機：LOGTHERMO DGL0100 を用いた。河川の温度は夏季において 20℃程度冬季において 10℃程度と想定した。

夏季において外気温を高温側、水温を低温側とするとすべて駆動できると考えられる。しかしながら、冬季においては外気温を高温側とした場合に気温だけではすべて駆動できないと考えられる。冬季にこれらの合金を駆動させる場合、高温側での加熱が必要であることから②が最適であると考えられる。

以上の検討より②の合金を採用して船の制作を行った。

Table1

(①Af点 : 40℃ 線径 : 0.5 mm)
 (②Af点 : 35℃ 線径 : 0.6 mm)
 (③Af点 : 35℃ 線径 : 0.4 mm)

℃	42.3	40.3	38.3	35.8	34.3	32.5	30.4	27.4	26.0	24.7	22.1	21.2
①	○	○	○	○	○	○	△	×				
②	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	×
③	○	○	○	○	○	○	○	△	△	×		

※ ○…自然長に戻った
 △…収縮したが自然長には戻らなかった
 ×…収縮しなかった

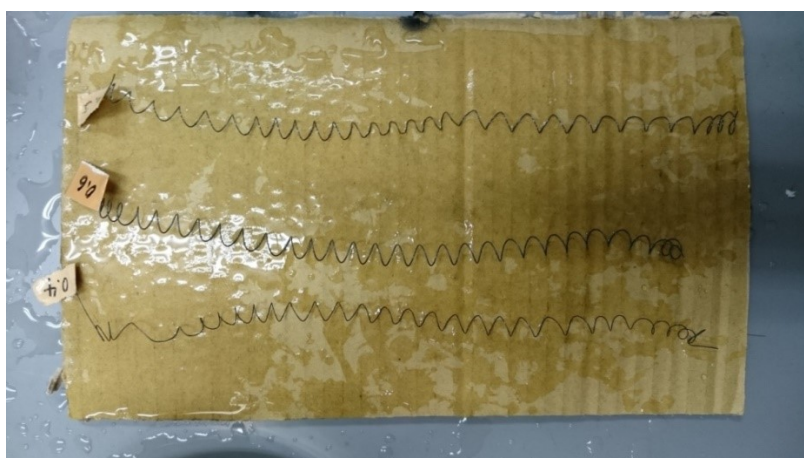


Fig.14 冷却し伸ばした状態

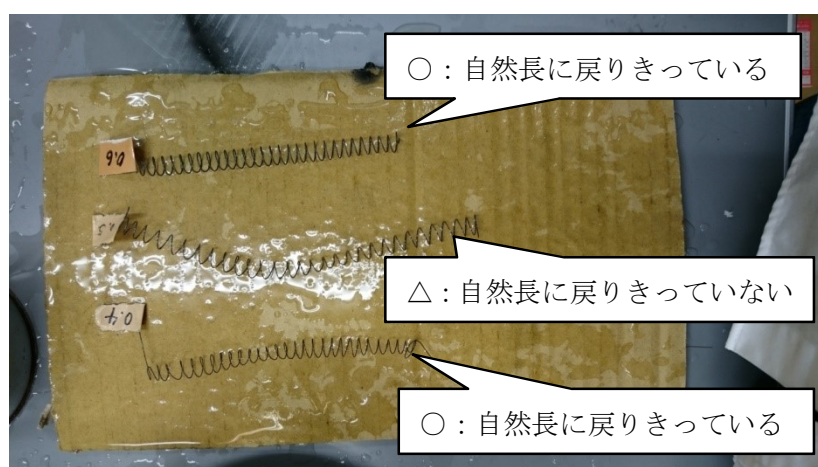


Fig.15 お湯をかけて戻した状態

5. 船の制作（高温側：外気温 低温側：水温）

5.1 エンジン部

本実験では、当初予定していたギアを介した駆動方法を見直し、より簡単に製作でき、確実に駆動させるため、回転円盤部と外輪水車をアクリル軸で直結した。アクリル軸は回転軸受で支持し、アクリルで製作した箱型部品で固定した。Fig.19 にエンジン部を示す。

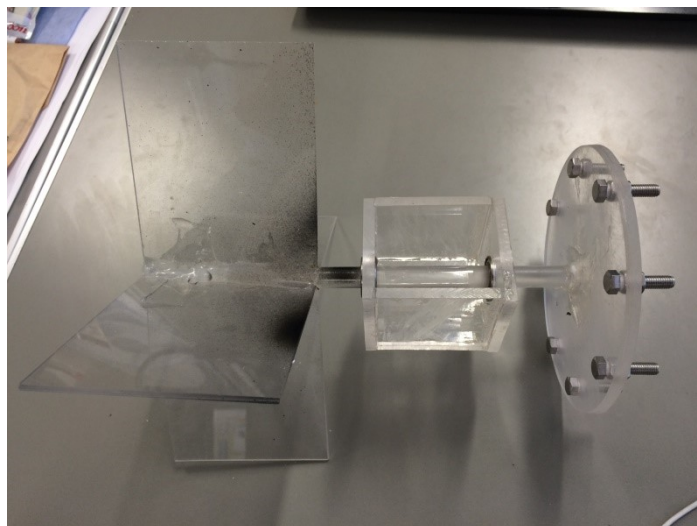


Fig.19 エンジン部

5.2 船体の制作

船は2回の改良を施し、年間を通して確実に駆動するものを目指した。

(1) 1号機

(a) 装置概要

まず初めに製作したものを Fig.20 に示す。船体は発泡スチロールを三角形形状に切り貼りして作り、合金は8本使用した。これは、ある時刻において水中、外気により多くの合金を同時にさらすことで、縮む際の回転円盤全体のトルクを増大させるためである。合金は、円板にキリ穴を空け、ボルトとナットで挟むようにし固定した。円盤の取り付け角度は45度である。

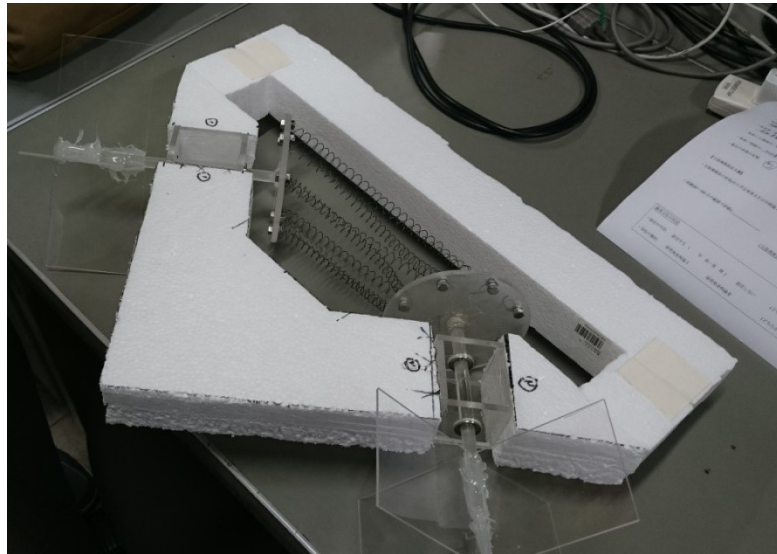


Fig.20 1号機

(b) 駆動実験

まず、円板の回転がスムーズに行われるのか検証するため、円盤の半分をお湯にさらし、回転するかを検証した。本装置はギアを介して 2 つの円盤が回転していないため左右で回転にバラつきができ、8 本の合金が絡んでしまった。そのためスムーズに回転が行われず、最終的には回転が停止してしまった。

(2) 2号機

(a) 装置概要

1号機では合金が 8 本あり絡みやすいことが欠点であったため、2号機では 6 本に減らした。Fig.21 に示すとおり、1号機の円板の上に、円周上に等間隔に 6 個合金を固定できるようにキリ穴を開けたアクリル板を固定し、ナットで合金を固定した。

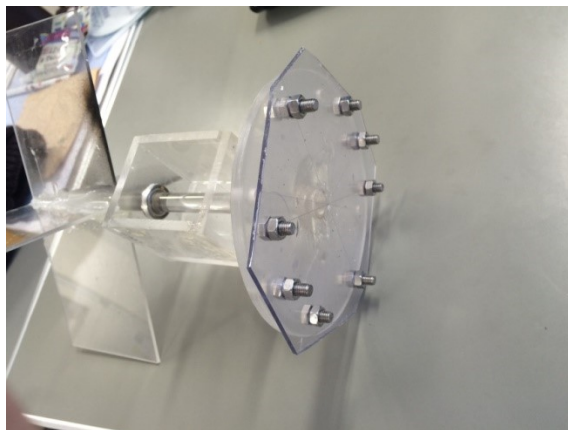


Fig.21 2号機エンジン部

(b) 駆動実験

Fig.22 のように円盤の半分を温水で温め、半分は冷水を使用して冷却する。これにより温度差をつけて円板が回転するか実験をした。気温 28°Cにおいて温水の温度を 20°C, 25°C, 30°Cと上げていった結果, 25°C以上の条件で回転した。また, 合金を 6 本に減らしたことで回転はスムーズになった。



Fig.22 実験風景

(c) 実証実験

この装置では, 温度差を与えれば駆動することが確認できたので, 次に, 実際の環境において駆動するかどうかを検証した。まず, 気温が高い夏季の条件において実験を行った。2号機を小さなプールに張った水に浮かべ, 周囲をダンボールで囲い, ドライヤーで船の周囲の空気を温めたが, 船は起動しなかった。この時, 気温は 40°C, 水温は 25°Cであった。ドライヤーの風が直接合金に当たっているときは駆動したが, ドライヤーを止めると駆動しなかった。ドライヤーでは空間の温度を温めるのにあまり適していないため別の方法を検討した。

(3) 3号機

(a) 装置概要

2号機では, 空気による対流伝熱によって合金を加熱するには気温が十分高くなかったため, 外気温より合金の周囲の空気の温度を上げる必要があった。そこで, 今度は Fig.23 に示すとおり, 合金の周囲を, 黒く塗った薄いアルミの板でドーム状に囲い, ビニールで保温した。こうすることで太陽の輻射をアルミ板が吸収し, 高温になり対流伝熱によってドーム内の空気を加熱できると考えられる。



Fig.23 3号機①



Fig.24 3号機②

(b) 実証実験

屋外にプールを設置し、船を浮かべ、実際に太陽光を当てることで駆動するかを実験した。日射が最も強くなる外気温 23°C の昼間において 2 時間程度加熱したが駆動しなかった。船が動かなかった理由として以下の 2 つが考えられる。まず一つ目に、空気によるばねの加熱がうまくできなかつたことが原因と考えられる。空気の熱伝達率は水と比べて $1/40$ 程度と小さく、対流伝熱による合金の加熱はこの気温条件では難しいと考えられる。二つ目に、水をくぐって出てきた合金の表面には水膜が存在し、水が気化する過程で合金から熱を奪うことで、合金自身の加熱がうまくできなかつたことが理由であると考えられる。

1~3 号機の実験結果からわかるように、水で冷やされたバネを空気で加熱するのは困難である。一方、2 号機の駆動実験からわかる通り、温水で温め、空気で冷却することで駆動できることは確かである。これは、水の気化による吸熱が合金の冷却を促進するため駆動できると考えられる。よって、水温を高温側とした機構で駆動できる船を検討した。

6. 船の制作（高温側：水温 低温側：外気温）

水温を加熱する方法として、水を入れた水槽を用意し黒塗りした金属の中に入れた。この金属が太陽からのふく射により加熱され、対流熱伝達により水温を上昇させる。屋外に1時間放置する実験を行った結果、外気温が 19℃、水温が 21℃の場合、水温が 31℃まで上昇した。この結果より、駆動部に小型の水槽を取り付けた船の制作を行った。

6.1 アクリル水槽

Fig.25 に駆動部に取り付ける小型水槽を示す。水槽はアクリル板をグルーガンで接着し、水の漏れやすい部分はシールパテで埋めたものである。容器は熱容量を小さくし水温を上げやすくしたいため駆動部の円盤が入る最小の形状とした。



Fig.25 アクリル水槽

6.2 形状記憶合金の再選定

駆動部の機構が大きく変更されたため形状記憶合金の Af 点を再検討した。夏季冬季ともに同一の形状記憶合金で駆動することを目指すため夏季冬季それぞれにおいて駆動する機構を検討した。

6.2.1 夏季の場合

(i) 検討

水を満たした水槽を屋外に設置し、水温と気温を計測した。金属プレートを設置していない場合の実験結果を Fig.25 に示す。日射量は1時間ごとの積算値である。結果より外気温よりも水温の方が常にやや高くなっているが、ほぼ追従していることがわかる。これは秋季に行った実験であるが夏季においても同様のことが言える。夏季では外気温が 35~40℃程度まで上昇することから水温も同程度まで上昇すると考えられる。その場合、Af 点が 35℃の形状記憶合金では作動するための条件を満たせない可能性が大きい。したがって、Af 点を上げる必要がある。しかしながら、Af 点が 45~65℃までのものは一般的に流通しておらず、入手が困難である。そこで、Af 点 40℃の合金を用いて駆動させる方法を検討した。

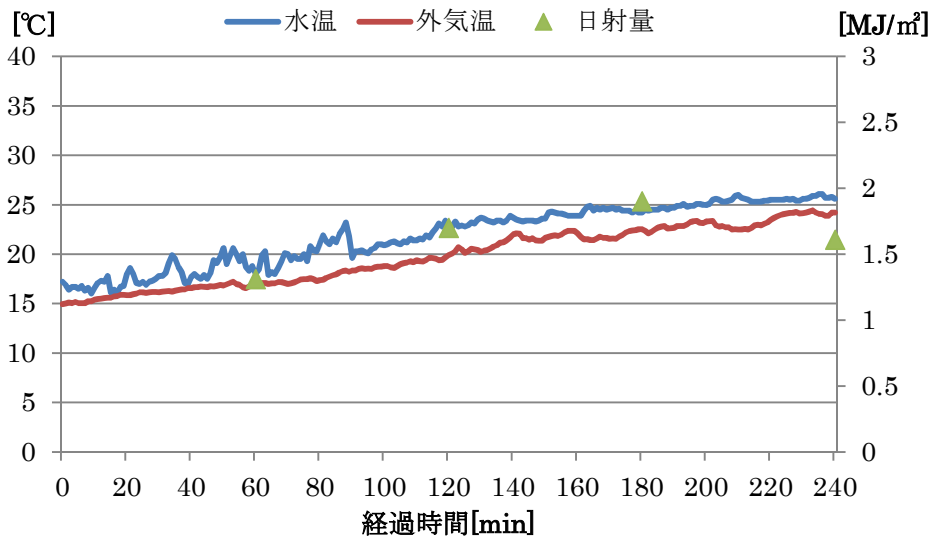


Fig.25 水温の上昇(アクリルプレート無)

(ii) 実験

4.3.1の結果より Af 点 40°Cの合金でも 30°C程度から形状が回復している。そのため 30~40°Cの範囲で、元の形状に戻ろうとする力に温度依存性があれば微小な温度差でも駆動させることができる。そこで、Af 点 40°C、線径 0.5mm の形状記憶合金を用いて温度依存性を検討した。

Af 点以下に保持しながら伸ばした合金をぶら下げそれに重りを取り付けた。これに Af 点である 40°Cのお湯をかけ、収縮して静止した位置に印をつける。この位置を基準点とする(Fig.26)。4.3.1の結果から得られた収縮が行われる温度範囲の 30°C~39°Cのお湯をかけ、収縮した位置に同様に印をつけ基準点との差を計測する(Fig.27)。得られた実験結果を Fig.28 に示す。

実験結果からお湯の温度が Af 点に近くなるにつれ基準との差が小さくなっている。このことから、元の形状に戻ろうとする力は合金の温度に依存することがわかる。夏季において外気温、水温ともに形状が戻り始める温度である 30°C以上になっても温度差をつければエンジン部を駆動させることができると考えられる。

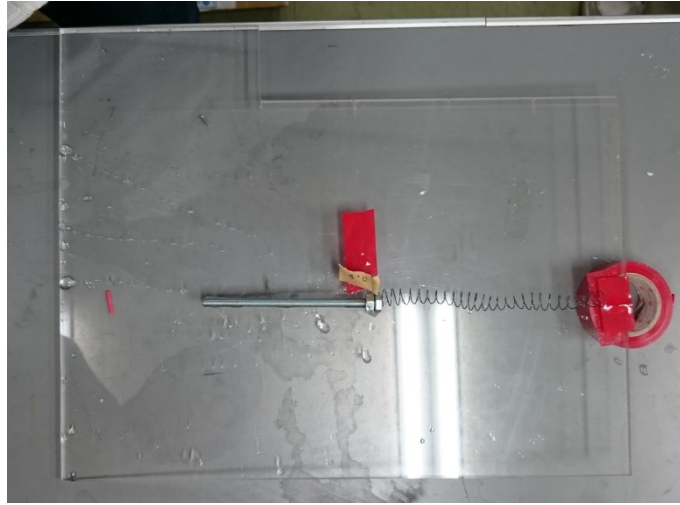


Fig.26 40°Cのお湯をかけた後の様子(基準点)



Fig.27 32°Cのお湯をかけた後の様子

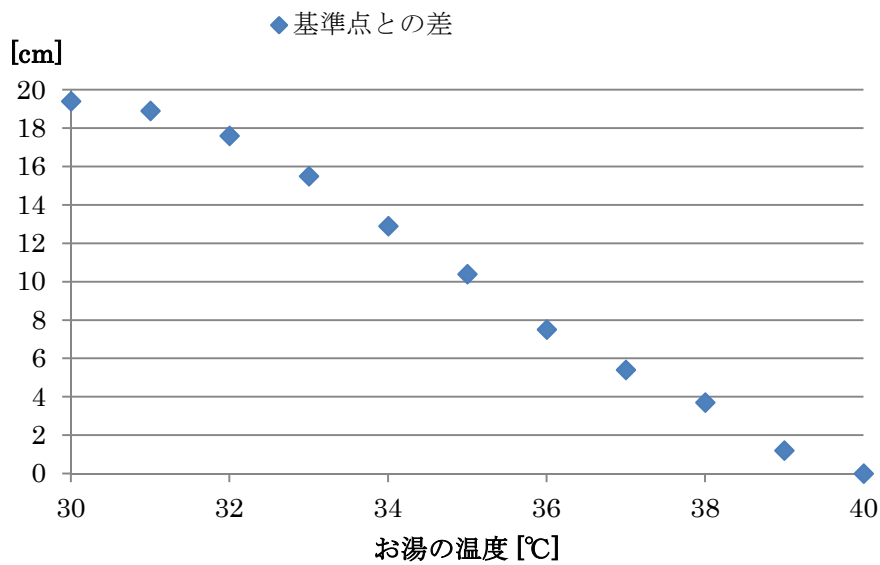


Fig.28 弾性力の温度依存性

(ii) 冬季の場合

水槽に黒塗りしたアルミプレートを設置する(Fig.29)。アルミプレートは水槽の各面に対して設置できるように制作してあり容易に着脱できる。各面にプレートを設置したことにより太陽の位置にかかわらず水温を上昇させることが可能である。屋外に放置した際の結果を Fig.30 に示す。水温は加熱開始時の温度よりも 15°C程度上昇している。この結果より外気温が低くなる冬季において黒塗りしたプレートをアクリル水槽内に設置し、水温を上昇させることで駆動できると考えられる。

以上の検討より、Af 点 40°C、線径 0.5mm の形状記憶合金を使用することとした。

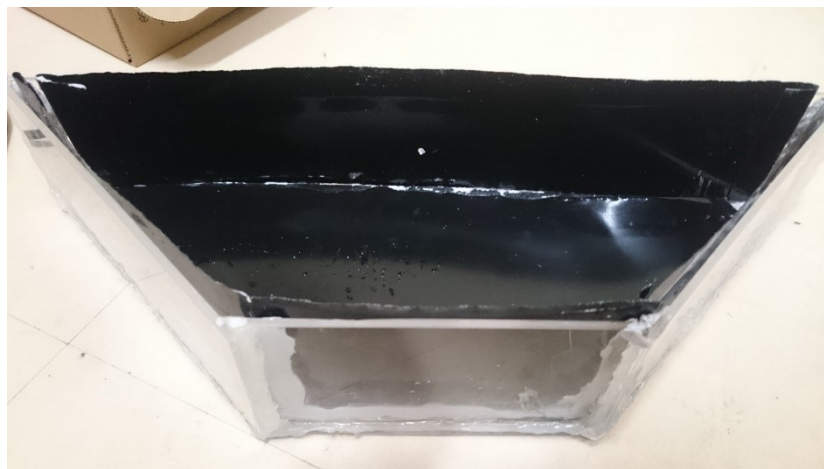


Fig.29 アクリル水槽(アルミプレート有)

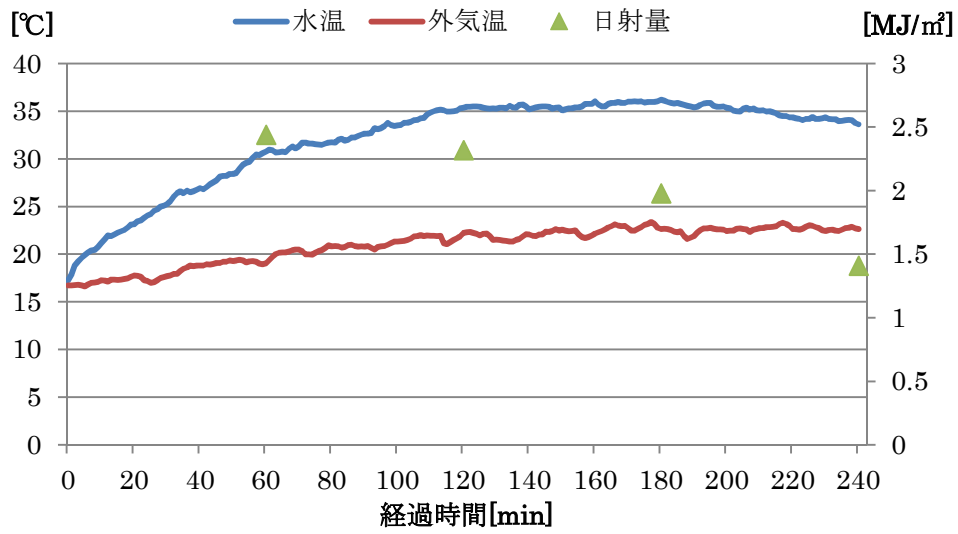


Fig.30 水温の上昇(アルミプレート有)

6.3 船体の制作

発泡スチロールの船体の上にアクリル製の台形型の水槽を設置し、水で満たした。Fig.31, 32 に船体の全体を示す。エンジン部の設置にはアクリルで作った箱型部品を用いて、回転円盤がアクリル容器内の水にちょうど半分浸かるように調整した。



Fig.31 船体①

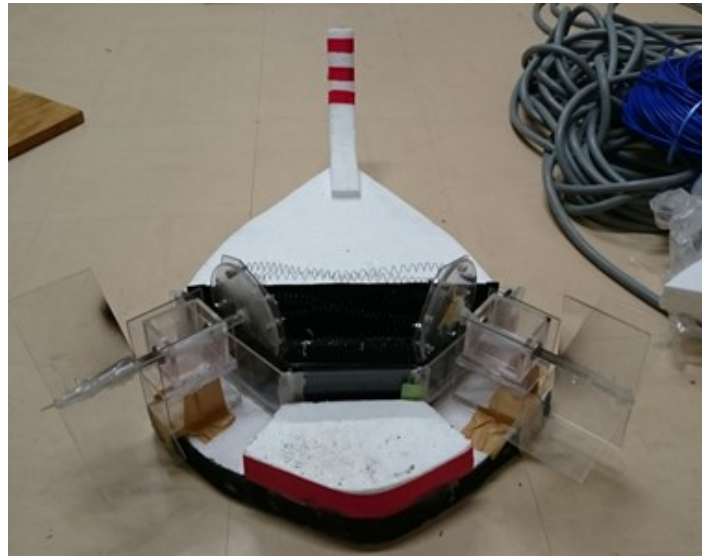


Fig.32 船体②

6.4 駆動実験

6.4.1 夏季における駆動実験

夏季を想定した実験を室内で行った。室温が 33.7°C のとき、適当な水温によつての動作確認をした。水温が 33.7°C と室温と同じ温度でも稼働することが確認できた。これは合金が水から上がったときに、合金表面の水が気化して合金から吸熱するためと考えられる。この結果から夏季においてアルミプレートを設置する必要はなく、外気温が Af 点である 40°C 以上にならない限り駆動することができる。

6.4.2 冬季における駆動実験

まず、屋外でアクリル容器内の水温が何 $^{\circ}\text{C}$ になれば駆動するのか確認するためお湯を用意し実験を行った。外気温が 20°C の時に実験したところ水温が 30°C 以上ないと駆動しなかった。冬季は日中 10°C 近くまで気温が下がるため水温を 30°C まで上げられるかが問題である。

そこで比較的気温が低い日中に屋外にアルミプレートを設置した装置を置き水温の上昇を確認した。その結果を Fig.33 に示す。結果から水温は目標値である 30°C に達していないことがわかる。

そのため Fig.34 のようにビニールで船体を囲むことで保温を行う方法を検討した。夜間 0 時から 24 時間装置を屋外に放置し水温と保温した空間の温度上昇を計測した。得られたデータを Fig35 に示す。水温は最大で 44.3°C まで上昇し、11:32~16:24 で目標温度である 30°C に達している。保温した空間の温度は水温よりも高くなっておらず、保温することによって冬季においても駆動させることができる。

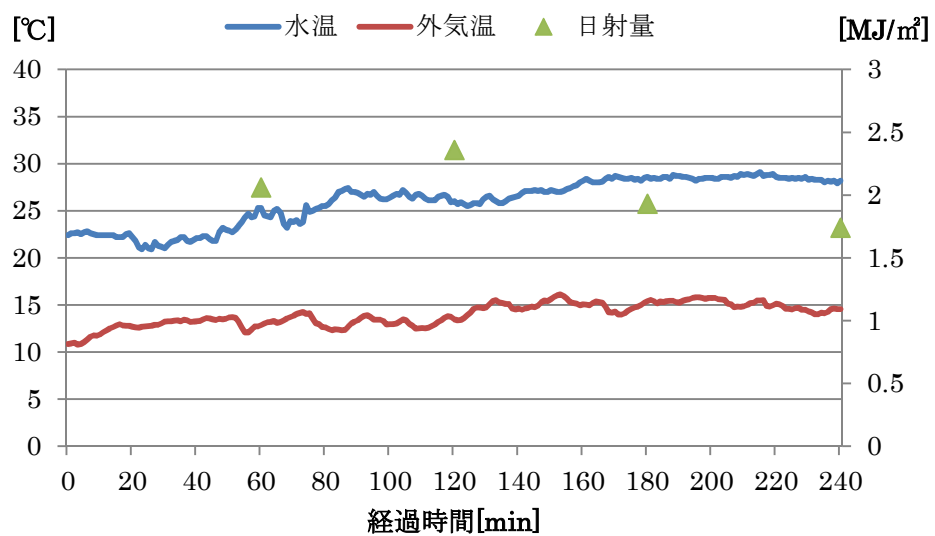


Fig.33 水温の上昇



Fig.34 保温した船体

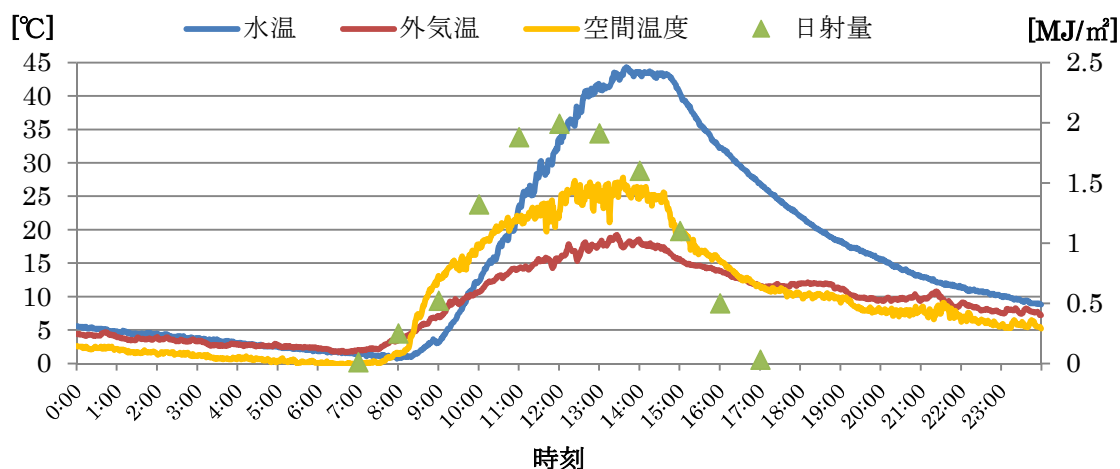


Fig.34 水温の上昇(保温有)

7. 撮影動画

撮影動画は大学内の池で実証実験を行ったものと夏季を想定した際の室内で撮影したものである。池で撮影したものは外気温が 11°C，アクリル容器内の水温は 34°Cであったときの様子である。アクリル容器内の水温は，黒塗りのアルミ板によって加熱を行ったものを用いた。夏季を想定したものは 6.4.1 の実験の様子である。

8. 結論

本実験ではコイル形状を記憶した形状記憶合金を用い，太陽光により加熱した水と外気温との温度差で年間を通して稼働できる船を制作した。その過程で得られた知見及び結果をいかに記す。

- (1) 合金に形状を記憶させる場合全体を均一に加熱することが重要であり，ろうそく，ライターなどでは均一に長時間加熱することができずに上手くいかない。電気炉を用いることで均一に長時間加熱するところでき形状を記憶させることができる。
- (2) U字型の形状は容易に作成することができるが他の合金と干渉してしまう点やある時刻において水につかっている合金が多すぎる点が問題である。波状にすることで干渉を抑えることができたが円盤を引っ張る力が足りずに作動しなかった。コイル状では引っ張り力の増加，および形状記憶時のむらの軽減を図れた。また，全体が伸縮部分であるため動力の伝達ロスも少なくなる。

- (3) 外気温を高温側とすると、水中から上がった合金の表面についた水が気化するときに合金から熱を奪うため駆動しない。水温を高温側、外気温を低温側とすると水の気化により冷却が促進されるため駆動することができる。本装置は水温が 30℃以上あれば駆動することができる。
- (4) アクリル容器を水で満たし太陽光で温度を上昇させてエンジン部に用いる。外気温が 20℃程度の時、塗りしたアルミプレートを設置することで水温を目標温度である 30℃にまで加熱することができる。
- (5) 合金が元の形状に戻ろうとする力は温度に依存する。そのため温度差をつけることによって力にも差が生じる。その力の差を利用することで 30℃以上の温度でもエンジン部を駆動させることができる。
- (6) 夏季に船を稼働させる場合、気温が 40℃を超えない限り駆動することができる。ただし比較的外気温が高い日(35℃以上)はアルミプレートを減らして水温が高くなり過ぎないようにする必要がある。
- (7) 冬季に船を稼働させる場合アクリル容器内にアルミプレートを設置しただけでは目標温度である 30℃に達しない。そこでアクリル容器部分をビニールで覆い保温することで目標温度に達することができる。
- (8) 本装置は太陽光を用いているが、集光システムは用いていないためどの位置からでも太陽光を受けることさえできれば船は稼働することができる。

9. 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。八光電機様には、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ご指導して頂いた武田哲明教授、船谷俊平助教には、深く感謝いたします。そして、ご協力してくださった武田研究室の皆様に感謝の意を表します。