

潜水・浮上！そして動く！潜水艇

所属先 山梨大学大学院医工農学総合教育部

工学専攻機械工学コース

代表者氏名 渡邊 征弥

藤上 健太 丸茂 勇貴

志賀 倫也

1. 背景及び目的

潜水艇の潜水・浮上の原理はよく知られているが、実際に潜水・浮上を実証することは容易ではない。そこで、私たちは潜水・浮上の原理として、熱による温度上昇に伴う空気の膨張を利用した潜水艇を考案した。熱源にはモーリアンヒートパック発熱剤(以下、モーリアン)を用いた。図1にモーリアンの加熱前と加熱後の写真を示す。これは水と化学反応を起こすことで90℃の熱湯を作ることができ、30分以上反応し続ける特徴を持つ。これを使い空気を膨張させ、潜水艇の浮力を大きくすると同時に、90℃の温水を用いて、周囲の水との温度差から熱電変換素子により電力を発生させ、潜水艇の動力に利用するシステムを構築する。本提案では、熱による気体の膨張と熱電変換素子を用いて、潜水・浮上をしながら動く潜水艇の製作を目標にする。

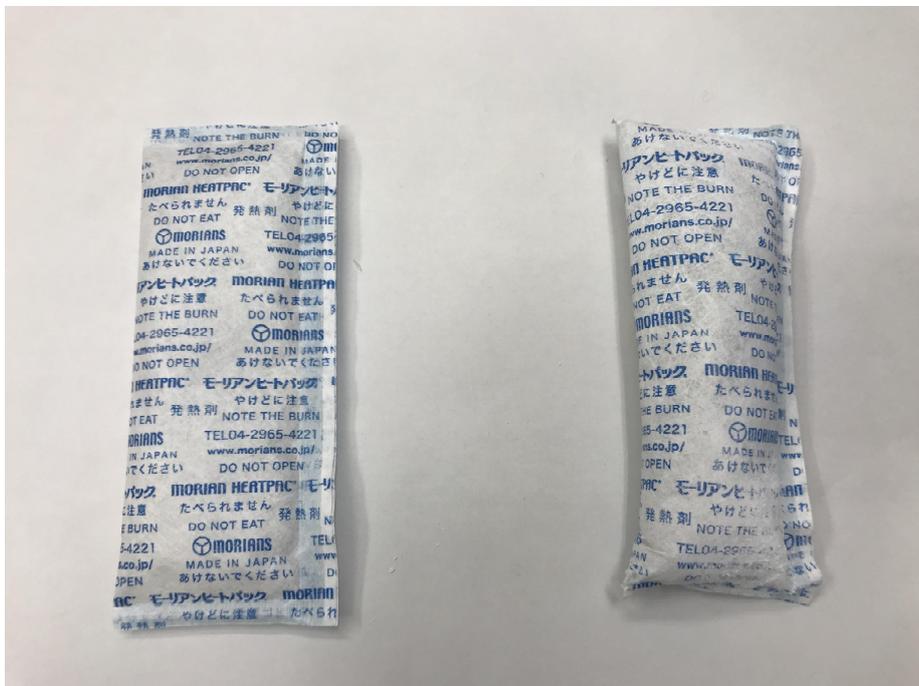


図1 モーリアンヒートパック発熱剤 (左：発熱前 右：発熱後)

2. 潜水艇の概要

潜水艇の概略図を図 2，船体の概略図を図 3 に示す．潜水艇は図 2 のようにアクリルで形成し両サイドのバラストタンクと船体部に分ける．船体は仕切を用いて船首と船尾に区分することで，それぞれに異なる役割を持たせた．船首は熱による発電と浮上のための機構を，船尾は船首で発電した電力を利用し，スクリューを接続したモーターにより潜水艇の推進力を得る機構を構築する．動力源には熱電変換素子を船体内底面に敷き詰めるように設置し，熱源に水と化学反応を起こし発熱するモーリアンヒートパック発熱剤を用いることで，熱電変換素子上面の約 90°C の温水と下面の約 20°C の冷水との温度差を熱電変換に利用する．

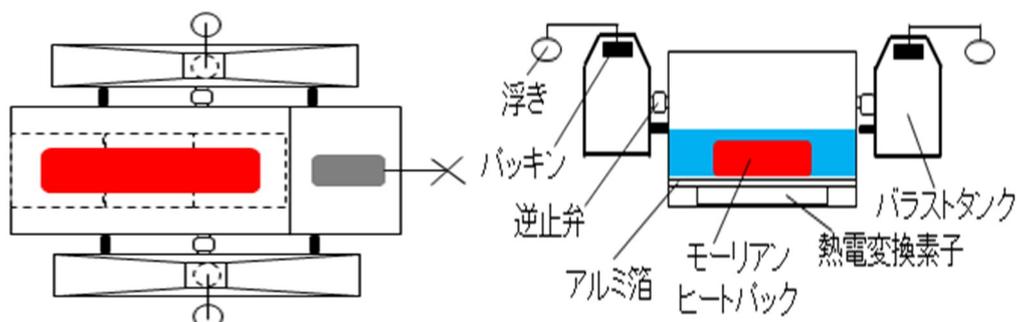


図 2 潜水艇の概略図(左：平面図，右：正面図)

図 3 のようにアルミホイルで熱電変換素子全体の上面を覆うことにより，熱電変換素子上面のみを加熱するようにした．船体とバラストタンク間のパイプには逆止弁を用いることでバラストタンク内の水が船体へと入ることを防ぎ，船体内の膨張した空気だけがバラストタンク内へと入るようにした．バラストタンクは上部と側部に穴を開け，上部は図 2 のようにパッキンを用いて水中では穴を塞ぎ，側部は水の出入り用に常に開放しておく．

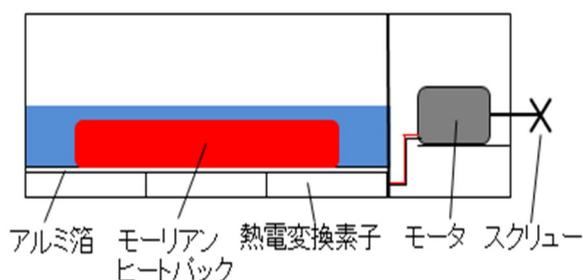


図 3 船体の概略図

3. 潜水・浮上の原理

潜水・浮上の原理を以下に図 4 を用いて示す．

- ① 潜水艇を水に浮かべると，バラストタンク側部の穴から水が入り，バラストタンク内が水で満たされると潜水が始まる．

- ② 潜水が始まるとバラストタンク上部が浮きの浮力によりパッキンで蓋をされることで、バラストタンクからの気体の流出を防ぐ。
- ③ 船体でモーリアンヒートパックと水が化学反応の発熱により空気を熱し膨張させる。また、水蒸気の発生も助力となり船体内の圧力が上昇し、バラストタンクへと空気が押し出され、浮上が始まる。
- ④ 潜水艇が水上まで浮上すると、パッキンが自重により下がることでバラストタンク内の空気が放出される。

以上①~④の工程により潜水・浮上が行われる。

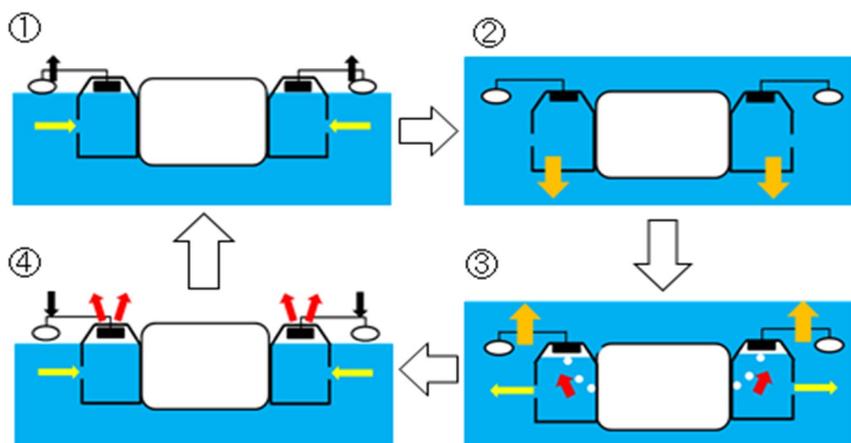


図 4 潜水・浮上の原理

4. 潜水艇製作

潜水艇の製作手順を以下に示す。

- 4.1 熱電変換素子の発電によるモーターの駆動実験
- 4.2 船体の製作
- 4.3 バラストタンクの製作
- 4.4 潜水、浮上バランスの調整

4.1 熱電変換素子の発電によるモーターの駆動実験

モーリアンを用いた熱電変換素子の発電によるモーターの駆動実験を行った。船体内を密閉にするためにモーリアンと水が反応した後に船体上部は蓋をした。モーターはマブチモーターRE-140RA(マブチモーター株式会社)を使用した。

4.1.1 熱電変換素子×1 船底上部設置・船底下部設置 (船体：アクリル)

図 5 にアクリルで製作した船体を示す。上面を加熱するために船体内底部に熱電変換素子を設置した。また、下面を冷却するために船体外底部に熱電変換素子を設置した。

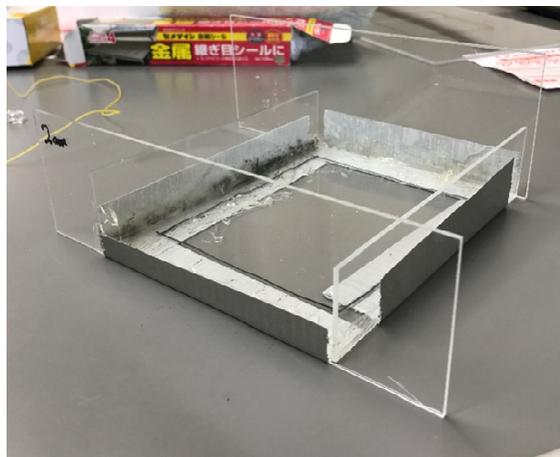


図 5 アクリル船体

● 実験結果

船底上部設置では加熱面は十分に加熱されていたが、冷却面がアクリルからの熱伝導では十分に冷却されず、モーターの駆動は確認できなかった。船底下部設置では冷却面は水中なため十分に冷却されていたが加熱面がアクリルからの熱伝導では十分に加熱されず、モーターの駆動は確認できなかった。

4.1.2 熱電変換素子×1 はめ込み型 (船体：アクリル)

4.1.1 では冷却面・加熱面の間にアクリルを挟むことで熱伝達に問題があったため、図 6 に示すように、冷却面は水で直接冷却、加熱面は熱水で直接加熱が出来るように、船底を熱電変換素子の形に切り出しはめ込めるように変更した。

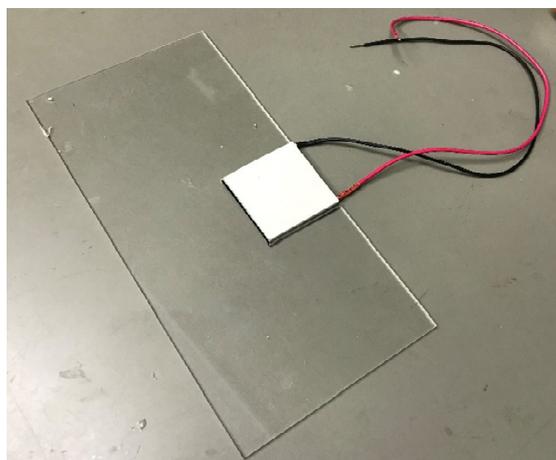


図 6 はめ込み型 熱電変換素子×1

- **実験結果**

冷却面・加熱面は直接熱伝達されているにもかかわらずモーターは駆動しなかったため、熱電変換素子が 1 つではモーターを駆動させる電力を発電することは困難であると考えられた。

4.1.3 熱電変換素子×3 はめ込み型（船体：ベークライト）

4.1.2 では、熱電変換素子 1 つでは発電できる電力に限界があるため、第 9 回熱コンに参加された呉工業高等専門学校が製作した魚ロボットを参考にし、図 7 に示したような、熱電変換素子を 3 つに増やし並列で接続することで、モーター駆動に必要な電力を確保できるよう変更した。また、モーターによる船体の温度上昇に伴う熱電変換素子側面の温度上昇を抑えるために船体を熱伝導率が低いベークライトに変更した。

- **実験結果**

モーターにより熱電変換素子が加熱され、熱電変換素子の加熱面・冷却面で温度差が生じるとモーターは駆動した。表 1 にそれぞれのモーターの駆動実験の結果を示す。



図 7 はめ込み型 熱電変換素子×3

表 1 モーター駆動結果

	船底上部	船底下部	はめ込み
熱電変換素子×1	×	×	×
熱電変換素子×3	—	—	○

4.2 船体の製作

潜水艇の船体材料の選定を行った。モーリアンによる加熱後の船体内圧力上昇、熱及び水圧に耐えられる船体の製作を目的とした。実験は熱電変換素子の実験と並行して進めた。船体材料の耐熱温度を参照するために、実験中には船体内水温を測定した。

4.2.1 アクリル樹脂

加工が容易で安価なアクリル板（厚さ 3 mm）を用いて船体を製作した。アクリルの接着にはアクリル樹脂用接着剤（アクリサンデー株式会社）を使用した。船体内水温測定には温度測定器（LOGTHERMO DGL0100, 株式会社八光電機）を使用した。

● 実験結果

アクリル板では船体の水漏れや、数回実験を行うと熱による変形が起こった。アクリル板の厚みが薄いため安定した接着ができない、アクリル板の加工面が荒く安定した接着ができない、接着剤の接着が不十分等の問題があった。船体内水温は 80~90℃の範囲であったため、アクリル板の使用温度は限界に近かった。図 8 はアクリル板が熱により変形した写真。



図 8 アクリル板 (上：変形後 下：変形前)

4.2.2 ベークライト（紙基材フェノール樹脂積層板）

ベークライト（フタムラ化学）は加工性が良好で、モーリアンの発熱に耐える耐熱性を持つことと、比重が 1.3 であるため船体を水中に浮かべた際に、潜水艇が自重で沈むように調整しやすいと考え、船体に使用した。ベークライトの接着には接着した際に隙間を作らず、モーリアンによる 90℃の高温にも耐えられる常温硬化型二液性エポキシ樹脂接着剤（以下、エポキシ接着剤、スリーボンドファインケミカル株式会社）を使用した。

● 実験結果

アクリル板加工時の失敗を活かすためコンターマシンを用いて切削した後、接着面を滑らかにするためにフライス盤で加工し、接着剤はベークライト同士の僅かな隙間からの水漏れを防ぐために多めに塗布し、重りなどで固定し接着剤を硬化させるために 10 時間静置して接着させた。ベークライトを用いた実験では船体の水漏れがなく、熱による変形は起こらなかったため、船体はベークライトを用いて製作することにした。また、実験ごとに船体の蓋のみを解体・接着しモーリアンを入れ替えるようにした。

4.2.3 潜水艇寸法（船首）

図 9 に潜水艇（バラストタンク抜き）の写真、図 10 に船体を第三角法で投影した三面図を示す。船体は船首側と船尾側に分けて製作し、船尾側にあるモーターに水が接触しないようにした。船首側の寸法はモーリアンが水と反応し体積が増大した後でも空間に余裕のあるよう設計し、それに合わせ熱電変換素子を配置した。また、船首側の上蓋には船体からバラストタンクに気体を流出させる逆止弁（TPX チェックバルブ、サンプラテック）2 つと船体に水を入れる逆止弁 1 つを取り付けた。



図9 潜水艇(バラストタンク抜き)

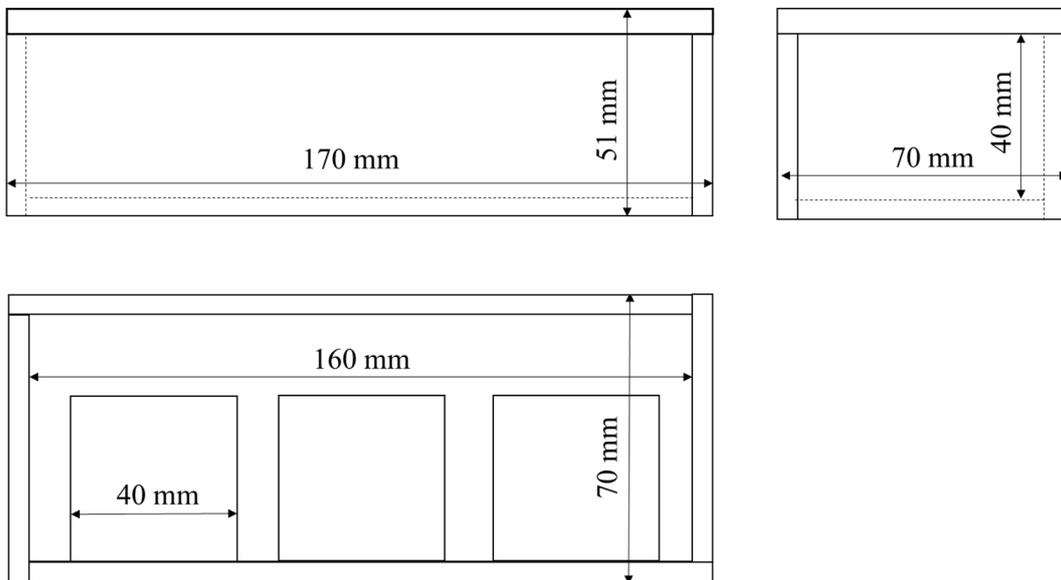


図10 船首の三面図

4.2.3 潜水艇寸法 (船尾)

図 11 に船尾の写真, 図 12 に船尾を第三角法で投影した三面図を示す. 船尾側の寸法は Z 方向を船首と同じにし, X 方向はモーターと配線が入るようにし, Y 方向は完成した潜水艇での実験を何度も行えるよう船首側の上蓋の高さ分 (5mm) 低く設計した. また, 蓋に熱電変換素子の配線を通すための穴を開けた. スクリューはモーターとスクリューをジョイント (マブチモータージョイント, レインボープロダクツ) で接続し, ベークライトにベアリング (ミニチュア玉軸受・小径玉軸受 ZZ, NTN) を埋め込むことで船体内に水の侵入を防ぎつつモーターの駆動を可能にした.



図 11 船尾

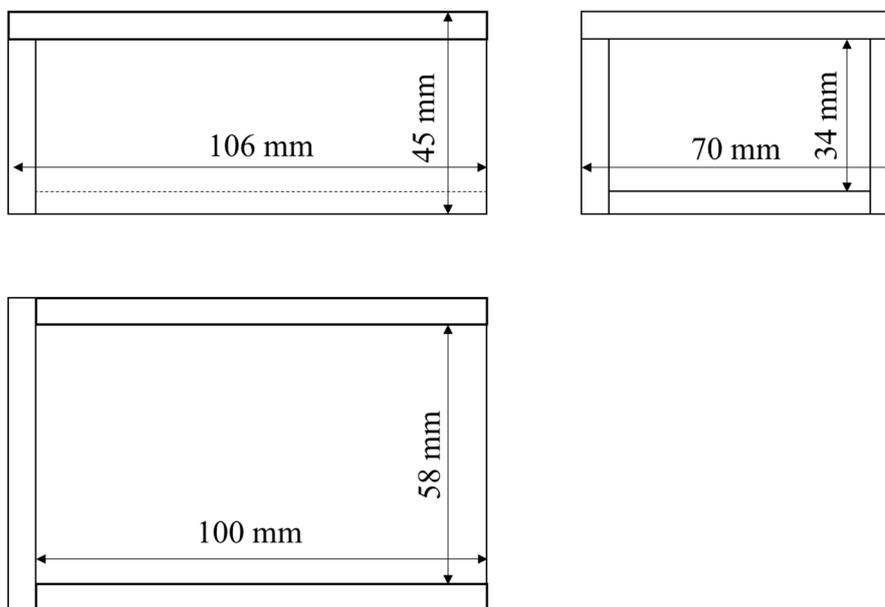


図 12 船尾の三面図

4.3 バラストタンクの製作

4.3.1 パッキン動作確認

4.3.2 船体内からの気体流出量の測定

4.3.3 バラストタンク寸法

4.3.4 潜水・浮上原理の製作

4.3.1 パッキン動作確認

バラストタンクのパッキン部分の動作確認のため、図 13 に示す実験装置を簡易的に製作し実験を行った。パッキンには直径 20 mm のゴムパッキン、バラストタンクには高さ 60 mm、1 辺 30 mm の正方形断面直方体（アクリル製）を使用した。浮きにはポリスチレンを使用した。バラストタンクを水中に沈め、下から空気を供給し、パッキンによりバラストタンク内に空気が漏れることなく充填するか確認した。

● 実験結果

実験の結果、パッキンにより空気は漏れることなくバラストタンク内に充填した。

浮きを 1 つにしたことで、パッキンが傾いたため、正確にパッキンが作動するように浮きの数を 1 つから 2 つに変更した。

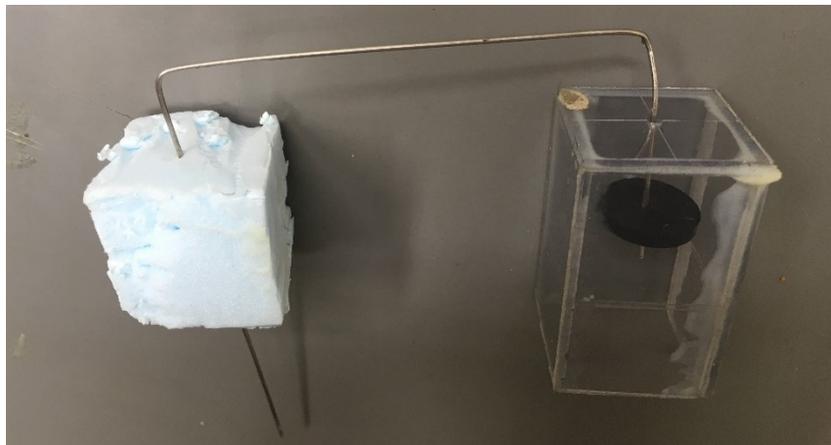


図 13 パッキン動作確認用実験装置

4.3.2 船体内からの気体流出量の測定

バラストタンクの容積をある程度決定するために、モーリアンが発熱した時の船体からバラストタンクへの気体の流出量を測定する実験を行った。同時に逆止弁が作用するのか確認した。船体の上部に、船体内に水を供給するための逆止弁と、船体内から船体外に気体

を流出するための逆止弁の計 2 つの逆止弁を取り付けた。気体流出用逆止弁と T 字管をシリコンチューブで繋ぎ、左右のバラストタンクに気体を供給出来るようにした。

● 実験結果

船体内から流出する気体の量は、左右のバラストタンク合わせて 4L 以上であることがわかった。モーリアンの発熱反応が始まって約 1~2 分程度で 2 つの 2L ペットボトル内に気体が満たされた。この実験では 2L ペットボトルを 2 つ使用し流出する気体の量を測定したため、4L 以上の測定はできなかった。

T 字管で分岐された気体はバランスよく左右のバラストタンクに供給されなかった。船体の僅かな傾きにより気体はどちらか一方のバラストタンクに供給された。このことから、船体内から船体外に気体を均等に流出させるために、2 つの逆止弁を船体上部に取り付けることにした。

4.3.3 バラストタンク寸法

図 14 にバラストタンクの三面図を示す。バラストタンクの接着には船体の接着と同様のエポキシ接着剤を使用した。上側はバラストタンク内に気体が溜まる際にバランスを取りやすくするように台形型にした。下側の寸法は 4.3.2 の実験結果から気体の供給量が多いため、潜水・浮上のバランスを考え、バラストタンクの最大まで気体が満たされたときに自重より浮力が大きくなるように設計した。バラストタンクの側面に直径 11 mm の穴を開け、シリコンチューブを接続し、船体から気体を供給できるようにした。また、船体との接着にはエポキシ接着剤を使用し、直径 10 mm、長さ 5.3 mm のアクリル棒 2 点で固定支持した。

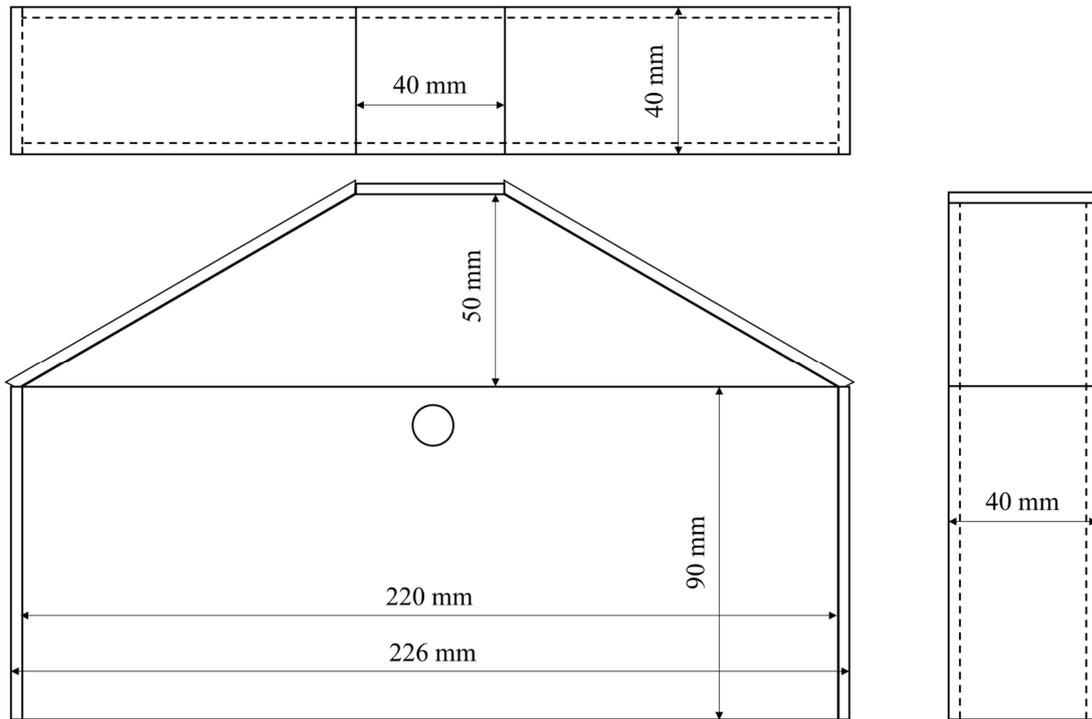


図 14 バラストタンクの三面図

4.3.4 潜水・浮上原理の製作

図 15 に潜水・浮上原理箇所を図を示す。バラストタンクの蓋は直径 1.0mm のステンレス棒を通して、滑らかに動かせるよう直径 1.3mm の穴を対角上に 2 箇所と、気体を放出させるために直径 8.0mm の穴を中心に 1 箇所開けた。図 15 のように蓋はステンレス棒を通したパッキン①と中心に気体を放出させるための穴を開けたパッキン②で挟むようにした。パッキン①は潜水時にバラストタンクの蓋となり、パッキン②はステンレス棒を固定し滑らかにステンレス棒を上下させる役割を持つ。浮きは 1 辺 30mm の立方体になるようポリスチレンを切削し、直径 1.0mm のステンレス棒を用いてパッキン②と固定した。図 16 は完成したバラストタンクの全体写真。

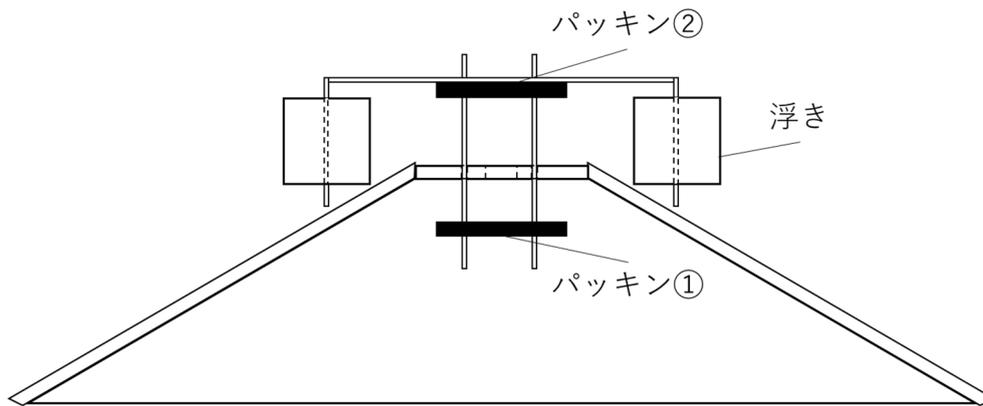


図 15 潜水・浮上原理箇所

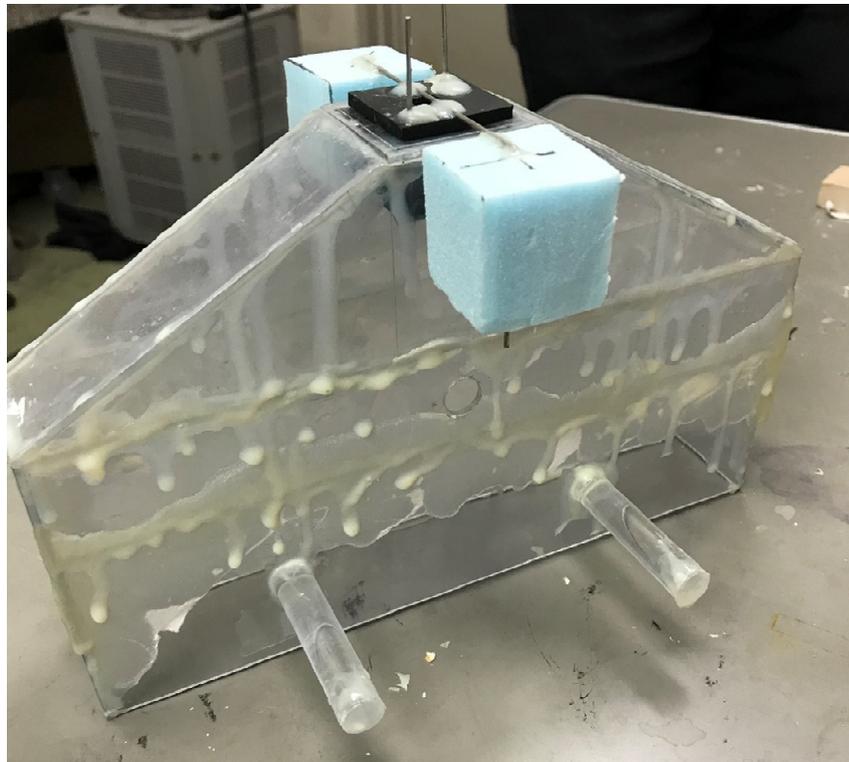


図 16 バラストタンク

4.4 潜水・浮上バランスの調整

潜水艇の体積に合わせバラストタンクに気体が溜まった時に浮上するようモーター部屋内に 340g の分銅，発熱部屋内に 300g の銅片，バラストタンクに 400g のステンレス板を取り付けた．図 17 に潜水艇初期段階の完成写真を示す．全体が完成したところで潜水艇に【T-sky】と命名した．

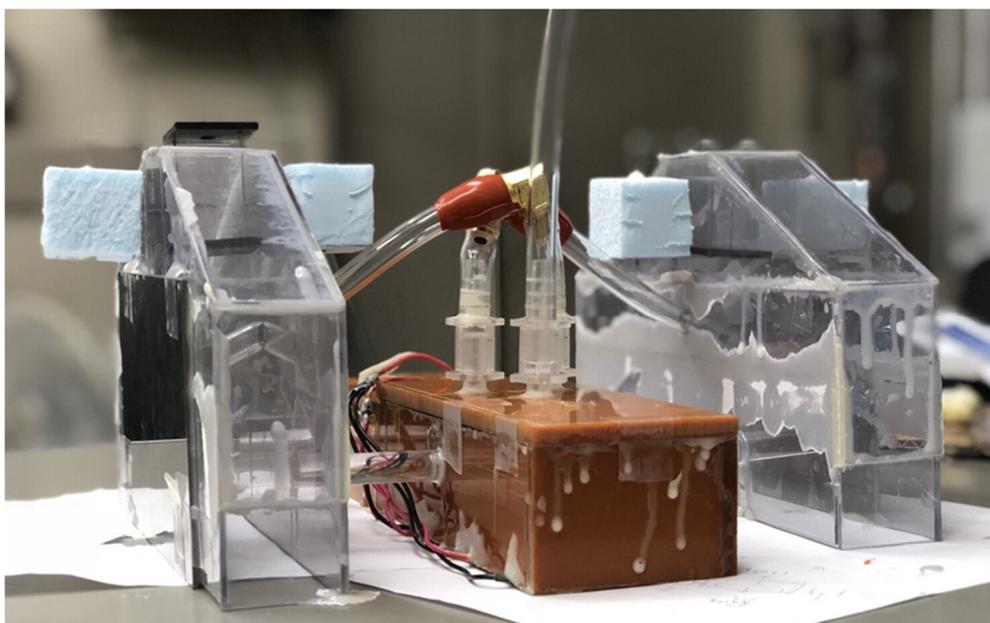


図 17 T-sky 初期段階の写真

5.1 潜水艇実験

各潜水艇実験の様子を別添の動画に示す.

5.1 潜水艇実験 1 回目

モータアンヒートパック発熱剤を使用した潜水艇の潜水, 浮上, 推進実験を行った. 実験は山梨大学甲府キャンパスのプールで行った.

● 実験結果

潜水艇の潜水は成功したが, 浮上は失敗した. 気体が L 字継手とチューブの接着部及びバラストタンク上部気体放出用の穴から漏れたことにより浮上に失敗した.

浮きが傾いたことでパッキン②が傾き, パッキン①がうまく機能しなかった.

モーターは駆動したが船体がプールの底に着いていたため, 推進しているか判別することはできなかった.

5.2 潜水艇実験 2 回目

実験は山梨大学甲府キャンパスのプールで行った.

浮きの寸法を縦×横×高さ=30×90×30 mm に変更し, パッキン①のバラストタンク上部気体放出用の穴を塞ぐ力を強くした. 気体漏れをしていた箇所をエポキシ接着剤で塞いだ.

● 実験結果

潜水艇の潜水は成功したが、浮上は失敗した。気体がバラストタンク上部気体放出用の穴から漏れたことにより浮上に失敗した。

パッキン②とステンレス棒が分離した。

モーターは駆動したが船体がプールの底に着いていたため、推進しているか判別することはできなかった。

5.3 潜水艇実験 3回目

プールでの実験は作業の効率が悪いので、実験は水槽で行った。

バラストタンク上部気体放出用の穴からの気体漏れが激しかったため、穴の径を 8 mm から 3 mm に変更した。

パッキン①とアクリル板では気体漏れを防ぐことが困難だったので、図 18 に示すようにパッキン③をアクリル板に取り付け、パッキン①とパッキン③により気体漏れを防ぐことができるようにした。

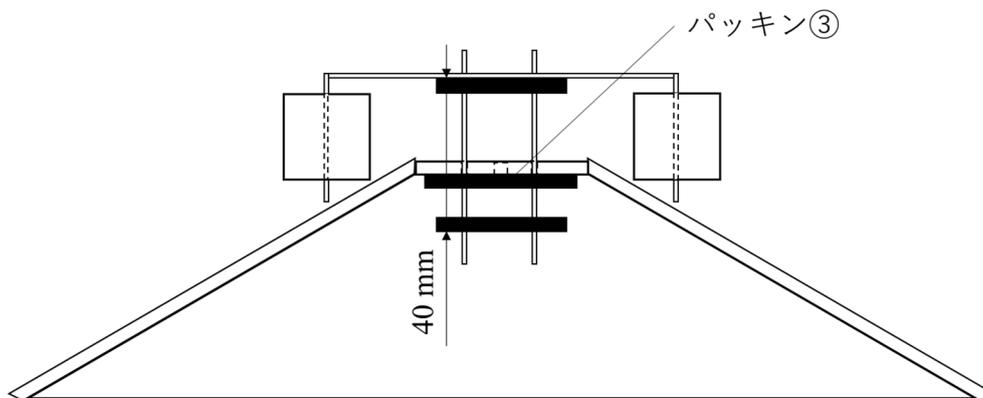


図 18 潜水・浮上原理箇所改善後

● 実験結果

潜水艇の潜水は成功し、浮上は確認できなかった。

パッキン①とパッキン③の密着による気体漏れは完全に防ぐことはできなかったが、前回の実験の場合よりも改善された。

モーターは駆動したが推進しているか判別することはできなかった。

5.4 潜水艇実験 4回目

実験は水槽で行った。

パッキン①とパッキン②が傾かず並行な状態を維持するために、パッキン①とパッキン②の距離を 10 mm 程度に狭め、パッキン①とパッキン③の密着力を強くした。

潜水艇が重いと判断し、モーター部屋内の分銅 200 g, バラストタンクのステンレス板 400 g を取り除いた。

浮きの浮力が強すぎるためパッキン同士の結び付きが強く、浮上した際にパッキン①が自重により下がらなくなるため、浮きを元の 1 辺 30 mm の立方体に戻した。

● 実験結果

潜水・浮上は確認できたが、潜水艇の質量が小さいため浮上のスピードが早く感じられた。パッキン①と②の距離を短くしたことで気体の漏れを抑えることができた。

船体は船首に 120g を水中でつけることである程度、前後のバランス保つことができた。

バラストタンクが軽いため左右のバランスが崩れ、潜水艇全体が片側に傾きバラストタンク下から気体が漏れた。

モーターは駆動したが船体が安定しなかったため、推進しているか判別することはできなかった。

5.5 潜水艇実験 5 回目

実験は水槽で行った。

前回の実験では潜水艇の質量を小さくしすぎたことから、船首及びバラストタンクのバランスが崩れてしまった。そこで、左右のバランスを取るためにバラストタンクの左右に銅板 150g をそれぞれ取り付けた。潜水艇の質量が大きくなりすぎて浮上ができなることを危惧し、今回の実験では船首側に重りは取り付けず、左右のバランスが取れるか確認することを目的とした。

● 実験結果

潜水・浮上は確認でき、左右のバランスも取れていることが確認できた。

船首側が軽いため潜水艇が前後に傾き、バラストタンク下から気体が漏れた。

5.6 潜水艇実験 6 回目

実験は山梨大学甲府キャンパスのプールで行った。

船首側が軽かったので、バラストタンク前方に銅板 16g を 2 つ取り付け、前後のバランスをとった。

● 実験結果

バラストタンク前方に銅板 16 g を 2 つ取り付けると船首側が重くなったので、実験中に重りの位置を調整することで潜水艇前後のバランスをとった。ここで、銅板 32 g をバラストタンクの前方に付けるか付けないかで、船首側または船尾側に傾くため、船体のバランスを完全に制御することは難しいと判断した。

結言

本実験では熱による気体の膨張と熱電変換素子による潜水艇実験を行った。その過程で得られた知見及び結果を以下に示す。

- (1) モーリアンを使った発電実験では、熱電変換素子 1 つを船体上部または船体下部に設置すると、モーターを駆動させるほどの電力は得られなかった。
- (2) モーリアンを使った発電実験では、熱電変換素子 1 つを加熱面と冷却面を直接熱伝達できるように熱電変換素子を船体にはめ込む方式を取ったが、モーターを駆動させるほどの電力は得られなかった。
- (3) モーリアンを使った発電実験では、熱電変換素子 3 つを並列に接続し、はめ込む方式を取ることでモーターを駆動させる電力を得ることができた。
- (4) 船体の製作では、船体材料にアクリル板を用いると、水漏れや熱による変形、接着不良が起こったため、船体材料には使用できないことがわかった。
- (5) 船体の製作では、船体材料にベークライトを用いると、水漏れや熱による変形が起きず、船体内部の圧力が上昇しても、それに耐え得る船体を製作することができた。
- (6) 船体の接着にエポキシ接着剤を用いることで、接着不良と水漏れを完全に防ぐことができた。
- (7) モーリアンにより発生する気体の量は、潜水艇を浮上させることが十分可能な量であるとわかった。
- (8) バラストタンク内の水中での気体流出を防ぐためにパッキンとアクリルを用いたが、気体の流出を防ぐことはできなかった。
- (9) バラストタンク内の水中での気体流出を防ぐためにパッキンとパッキンを用い密着力を強くすることで、気体流出を防ぐことができた。
- (10) 潜水艇実験 1, 2, 3 回目では潜水はしたが浮上はしなかった。スクリューは駆動していたが推進しているかは判別できなかった。
- (11) 潜水艇実験 4, 5, 6 回目では潜水・浮上が確認できたが、スクリューによる推進は確認できなかった。
- (12) 潜水艇実験では船体内から各バラストタンクへ供給される気体の量の変化と潜水艇のバランスが相互作用を与えるため、潜水艇が一度傾くとバランスを崩しバラストタン

クの下から気体が漏れるため、潜水艇のバランス調整が非常に重要であることがわかった。

本実験は株式会社八光電機様より実験費の助成をいただきました。また、熱の実験コンテストという熱に関する理解を深めるだけではなく、私達が今まで培ってきた知識を最大限発揮することが出来る貴重な場を設けて頂き深く感謝の意を表します。

本実験を行うにあたり丁寧かつ熱心なご指導を下された武田哲明教授には深く感謝致します。そして多くのご指摘かつご協力をいただいた武田研究室の皆様にも感謝致します。