

ポンポン船を電気ヒータで走らそう

代表者 佐藤知宏

所属先 長野工業高等専門学校 電気電子工学科4年

1. 目的

環境負荷や有限であるという点から，化石燃料等の天然資源を永年に渡って使用していくのは年々難しくなっている．電気の世の中になったとはいえ暖房などの熱源は世界的にも電気の割合少なく，火を使っている．しかし電気ほど容易，安全，エコなエネルギーは他にはない．そこで電気と燃料による熱源の代替を行った際の問題点を検証する．

2. 原理

一般にポンポン船は銅またアルミパイプを熱することにより 内部の水が蒸発 パイプから噴出し推進力となる 噴出した際に水と空気で冷やされ，吸水を行う．このサイクルを繰り返すことにより船は進んでいく．実験ではパイプを熱する時点においてヒータによる熱源に代替し，進行するかどうか検討する．

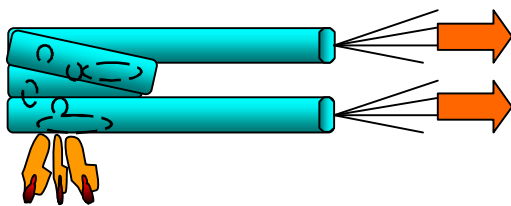


図1 噴出時

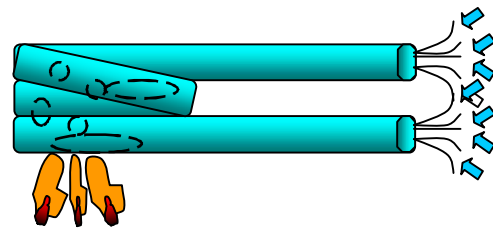


図2 吸水時

3. 実験

3.1 ポンポン船動力のエネルギー計算

ポンポン船の動力は水の状態変化による体積変化などによって推進力を得る．そこでパイプ内部の水が沸騰するまでの最低必要エネルギーを検討する．

パイプ（全長 54cm，口径 4mm）内の水の量が 3.5g において水の温度が 20 とし沸騰は 100 とすると沸騰までのエネルギーは，（水の比熱は 1 であるため 1g の水を 1 上昇させるには 1cal 必要である）

$$3.5 \times \Delta 80 = 2.8 \times 10^2 [\text{cal}]$$

$$* 1[\text{cal}] = 4.2[\text{J}]$$

$$2.8 \times 10^2 \times 4.2 = 1.2 \times 10^3 [\text{J}] \cdot \cdot \cdot$$

となる．

気体への状態変化として蒸発熱が加算される．

$$\text{蒸発熱} : \frac{41}{18} \times 3.5 = 7.9 \times 10^3 [\text{J}] \cdot \cdot \cdot$$

$$* \text{蒸発熱} : 41 [\text{kJ/mol}] = 41 [\text{kJ}/18\text{g}]$$

始動時の初期エネルギーは 100 までの温度上昇エネルギー + 水の蒸発熱より，

$$1.2 \times 10^3 + 7.9 \times 10^3 = 9.1 \times 10^3 [\text{J}]$$

$$* \text{J/s} = \text{W} \quad * \text{s} = 1 \quad [\text{秒}]$$

$$9.1 \times 10^3 = 9100 [\text{W}]$$

よってポンポン船を動かすには約 9100[W] 必要である．

しかしながら後の実験でも電気エネルギーの場合には，

電気エネルギー **熱エネルギー**

の変換が伴うためロスする部分が多いというのが現状である．

3.2 ポンポン船動力の可視化モデル

金属管では内部でおこる現象を観察することが不可能なのでガラス試験管を用いた実験で検証を行う．金属管とガラスでは熱伝導率や放熱性などの特性は違ってくるが，内部で起こる現象を見ることが可能であり，実験に耐えうる材質であるため採用した．図のように試験管を 500ml のビーカーに挿入し，固定する．試験管の底をバーナーで熱する，突沸しないように炎を調節していった．図では水の様子分かりやすいように着色してある．



図 3 可視化モデル

3.2.1 ポンポン船動力の可視化モデルの実験結果

熱する位置が変わっても結果的に水蒸気の空間が増えるだけであり，振動とはあまり関係が見られなかった．

また炎の大きさについては，炎が大きすぎても水蒸気の空間が増えるだけで震動が止まってしまった，炎が小さいとガラス管を沸騰の温度までに熱することに時間がかかってしまい振動がなかなか発生しない．

結果的には炎の量を調整することで振動が起こることが確認できた．振動が起きると水が噴出されるわけだが，試験管内のすべての水が噴出されるわけではなく，2割程度の水が振動により出入りしていた．

3.3 ポンポン船動力を電熱線にした可視化モデル

図のように試験管を 500ml のビーカーに挿入し，固定する．試験管の底部をラバーヒータで熱する．突沸しないように電力量を調整し，実験を行う．

3.3.1 電熱線（シリコンラバーヒータ）にした可視化モデルの実験結果

試験管にバーナーで実験した際と同じ場所をシリコンラバーヒータで熱した．電気ヒータでは熱量が少ないため，熱伝導率の悪いガラス，シリコンでは熱抵抗が大きく，ヒータ自体の温度が 125 程度，試験管が 100 以上に達していても自励振動が起きなかった．バーナーによる自励振動は観察することができるので，考えられる原因としては以下が挙げられる．

- 水が十分沸騰する熱量がない
- ガラスとシリコンラバーの密着が足りないことによるロス
- ガラスの熱伝導性が悪いことによる急激な温度上昇もしくは放熱がない



図4 シリコンラバーヒータでの可視化モデル

3.3.2 電熱線（シリコンラバーヒータ）での金属パイプ加熱試験結果

この実験ではシリコンラバーヒータとアルミパイプの密着性が悪く，自励振動を観察することはできるのだが，条件の詳細が把握しにくいものとなったため結果は省略する．

しかし，自励振動を観察できるということは，熱源は火でなくともよいという推測ができる．

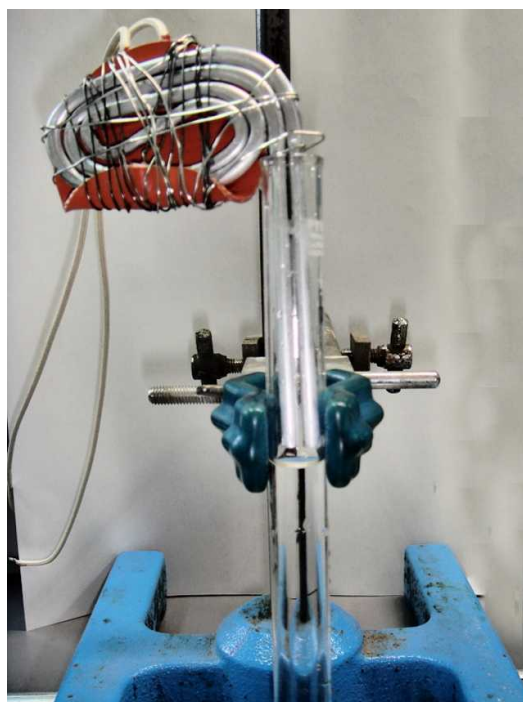


図5 ヒータによる金属パイプ加熱

3.4 ポンポン船動力の性能特性

コースはポンポン船用に全長 1.8m，水深 6cm，コース幅 10cm のプラスチック製のものを使用した。図 8 に 3.4.1～3.4.4 の実験で使用したポンポン船用コースの写真を示す。図 6～図 9 は順に使用したポンポン船の写真と，各実験で使用した動力パイプを示す。表中の材質はパイプの素材を表す。巻き数はパイプのらせん状の部位の巻き数である。口径はパイプの直径である。起動時間は燃料に火を付けてから自励振動が起こるまでの時間である。パイプ長は加工前のパイプの長さである。



図 6 ポンポン船用コース



図 7 ポンポン船（上）



図 8 ポンポン船（横）



図9 実験用に制作したパイプ

3.4.1 巻数変化試験

動力パイプのらせん状構造の部分の巻数を変更したパイプを船に取り付けコース内で走行させた。

表1. 巻数変化試験の結果

材質	巻数	速度[cm/s]	口径[mm]	起動時間[s]	パイプ長[cm]
アルミ	1	10.0	4	8	30
	2	10.0	4	18	45
	3	10.0	4	40	53

* 巻直径は共通して 20mm である。

* 燃料は燃料用アルコールである。

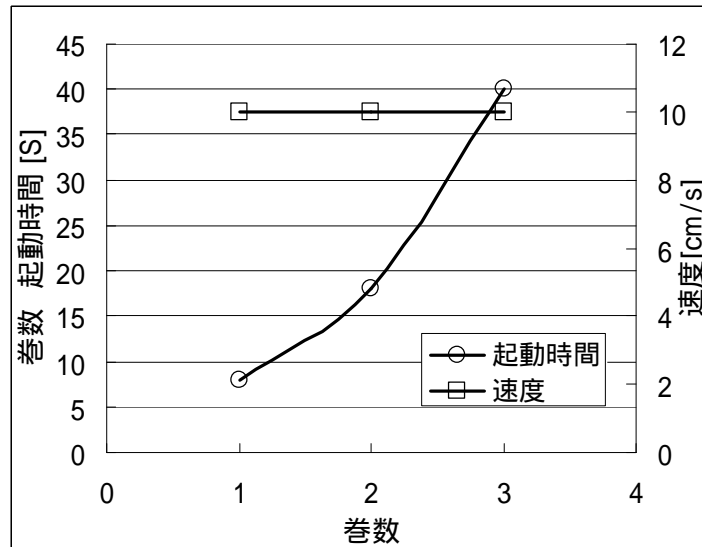


図 10 巻数変化特性

- 巻数が多い場合，始動するまでの時間がかかる．その後の連続する振動は安定する．
- 巻き数が少ない場合，始動するまでの時間が早い．

巻数変化において，パイプの熱する部分の体積の増大が生じる．起動するまでの時間がかかるのはやはり温める水の容量が巻き数に応じて増えているからである．

3.4.2 口径変化試験

口径の違うパイプを 3 種類用意し船に取り付けコースを走行させた．

表 2．口径変化試験の結果

材質	巻数	速度[cm/s]	口径[mm]	起動時間[s]	パイプ長[cm]
アルミ	3	8.3	4	33	45
		9.3	5	29	
		9.3	6	25	

* 巻直径は共通して 20mm である．

* 燃料は燃料用アルコールである．

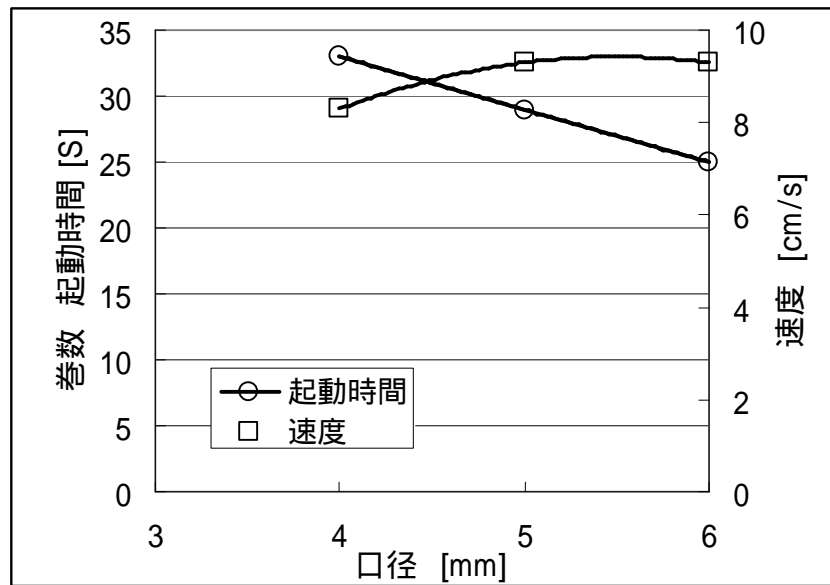


図 11 口径変化特性

- パイプの口径が大きいほど始動までの時間が短い
- 速度は大きな差というものは見られない

パイプの口径が大きくなると、パイプ内の水の容量が増えるため起動時間が長くなると予想していたが結果は逆であった。速度に関しては口径が大きいほど速くなっていた。

3.4.3 水温変化試験

コース内の水の温度をかけて船のパイプは口径 4mm の全長 53cm の三回巻のものを使用しコースで走行させた。

表 3 . 水温変化試験の結果

材質	巻数	コース内水温[]	速度 [cm/s]	口径[mm]	起動時間 [s]	パイプ長 [cm]
アルミ	3	22	10.0	4	18	45
		52	12.5	4	9	
		73	16.6	4	5	

* 巻直径は共通して 20mm である。

* 燃料は燃料用アルコールである。

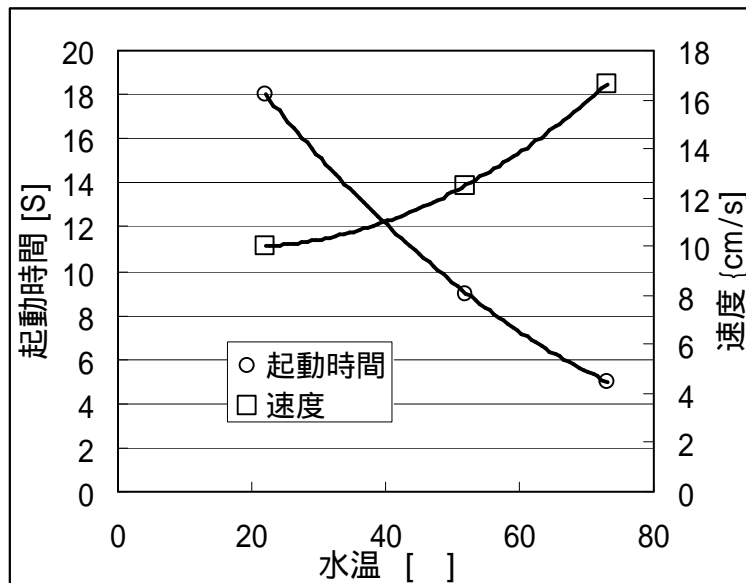


図 12 水温変化特性

グラフをから、水温が高温になるほど始動までの時間は短くなり速度も速くなる。振動も大きく連続して安定したものが得られるようである。パイプと水温の温度差から自励振動は起こるものだが、出力は沸騰することエネルギーに起因している。

3.4.4 口径形状変形試験

口径形状変化試験では特殊な形状はいくらでも作り出せるが、基本的なものとして内部圧力が高くなるのに比例し出力も上がると考え 1 回り小さいパイプを取り付けた。そのパイプを船に取り付け、コースで走行させた。

- 口径 6mm のパイプの両終端に、口径 5mm のパイプを全長 5mm 取り付けたパイプ
 - 口径 5mm のパイプの両終端に、口径 4mm のパイプを全長 5mm 取り付けたパイプ
- 上記の二種類の実験を行ったが結果は口径変化の実験と同じような結果となった。

3.5 自作ニクロムヒータによる自励振動

ポンポン船の動力に使えるような小さなヒータの入手が難しかったため、実験ではニクロム線をセラミックでアルミパイプに巻きつけた。

同時に通常のアルミパイプでは平面の円弧を作ることができずらせん状になってしまうため、パイプの一端だけを開放のパイプを自作し円状に巻いた。構造的には試験管と同じ一端だけの開放である。パイプは口径 4mm、長さ 30cm のものを使用した。ニクロム線の抵抗値は 20 Ω で 10 W のものを使用した。電源には直流安定化電源(メトロニクス、型番:535B)を使用した。温度計には TEMPERATURE HiTESTER (日置電機、型番:3446)を使用した。パイプをビーカーに固定し、通電した際に振動が得られるか試験を行った。

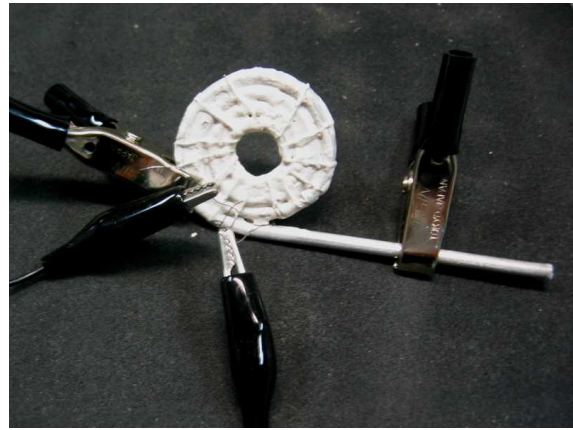
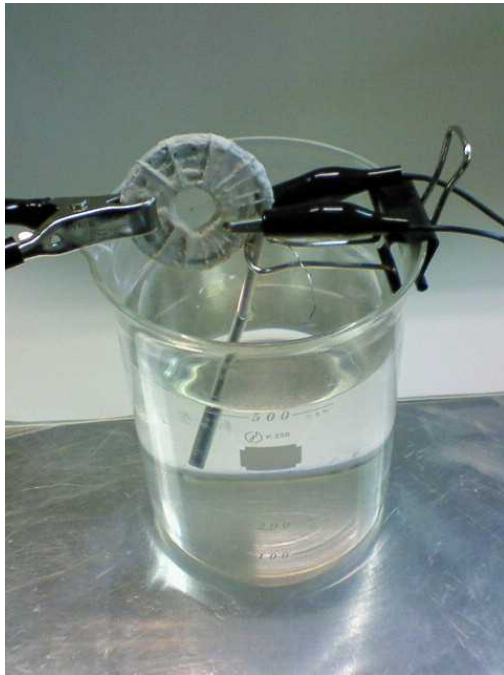


図 13 ニクロム線ヒータでの実験装置 図 14 セラミック固定のヒータとパイプ

3.5.1 電圧 5[V]での試験結果

表 4 より電圧 5[V]での通電試験結果を示す．この試験では自励振動を確認することができなかった．

表 4. 電圧 5[V]での通電試験の結果

時間[m]	電圧[V]	電流[A]	電力[W]	本体外部温度 []	水温[]
0	5	0.40	2.0	24.4	22
1	5	0.40	2.0	25.5	22
2	5	0.40	2.0	27.0	22
3	5	0.40	2.0	28.0	22
4	5	0.40	2.0	29.5	22
5	5	0.40	2.0	31.4	22
6	5	0.40	2.0	31.5	22
7	5	0.40	2.0	32.5	22
8	5	0.40	2.0	33.3	22
9	5	0.40	2.0	33.5	22
10	5	0.40	2.0	34.6	22

3.5.2 電圧 7.5[V]での試験結果

表 5 より電圧 7.5[V]での通電試験結果を示す。この試験では自励振動を確認することができなかった。

表 5. 電圧 7.5[V]での通電試験結果

時間[m]	電圧[V]	電流[A]	電力[W]	本体外部温度 []	水温[]
0	7.5	0.65	4.9	27.0	22
1	7.5	0.65	4.9	35.7	22
2	7.5	0.65	4.9	40.4	22
3	7.5	0.65	4.9	47.5	22
4	7.5	0.64	4.8	49.6	22
5	7.5	0.64	4.8	51.8	22
6	7.5	0.64	4.8	53.2	22
7	7.5	0.63	4.7	55.0	22
8	7.5	0.63	4.7	57.0	22
9	7.5	0.62	4.7	58.3	22
10	7.5	0.62	4.7	59.0	22

3.5.3 電圧 10[V]での試験結果

表 6 に電圧 10[V]での通電試験結果を示す。この試験では自励振動を確認することができなかった。

表 6. 電圧 10[V]での通電試験結果

時間[m]	電圧[V]	電流[A]	電力[W]	本体外部温度 []	水温[]
0	10	0.89	8.9	27.0	23
1	10	0.90	9.0	35.7	23
2	10	0.91	9.1	40.4	23
3	10	0.91	9.1	47.5	23
4	10	0.91	9.1	49.6	23
5	10	0.91	9.1	51.8	23
6	10	0.91	9.1	53.2	23
7	10	0.91	9.1	55.0	23
8	10	0.91	9.1	57.0	23
9	10	0.91	9.1	58.3	23
10	10	0.91	9.1	59.0	23

3.5.4 電圧 15 ~ [V]での試験結果

表 7 に電圧 15 ~ [V]での通電試験結果を示す .

- 3 ~ 4 分時 断続的な振動を確認 弱い振動である
- 5 ~ 10 分時 連続的に振動 強い振動 , 弱い振動が断続的に起こる
- 11 ~ 12 分時 強い振動が連続的に起こる
- 13 ~ 14 分時 強い振動もしくは突沸 (急激な振動) が起こる

消費されたエネルギーは以下ようになる .

$$3[\text{分}] = 180[\text{秒}] , \quad 21.3[\text{W}] \times 180[\text{秒}] = 3.8 \times 10^3[\text{J}]$$

$$21.3 \times (180 \div 3600) = 1.38[\text{Wh}]$$

実験 3.1 エネルギー計算からこのパイプでの水の量で最低必要エネルギーは約 5000[kJ] である . つまりこの実験での動作までエネルギー量のほうが少ないのである . 電熱線でのパイプを取り巻く部分はパイプの 80%弱となることから水を沸騰させる量がすくなくなるから , 熱量 $\times 0.8$ として 4000[J]これで実験値と比較的近い値をとることになる .

ビーカー内の水温については , パイプの振動が起こることでパイプ内の熱水との循環が水温上昇の要因となった . つまり水中の中にある部分パイプからはそれほどのエネルギーは消費してはいないようである .

表 7. 電圧 15 ~ [V]での通電試験結果

時間[m]	電圧[V]	電流[A]	電力[W]	本体外部温度 []	水温[]
0	15	1.42	21.3	25.6	23
1	15	1.42	21.3	54.5	23
2	15	1.42	21.3	60.8	23
3	15	1.42	21.3	60.9	24
4	15	1.42	21.3	61.0	24
5	15	1.42	21.3	63.0	24
6	15	1.42	21.3	63.5	26
7	15	1.42	21.3	65.3	26
8	15	1.42	21.3	66.1	27
9	15	1.42	21.3		27
10	15	1.42	21.3		28
11	17.5	1.61	28.2		28
12	17.5	1.61	28.2		29
13	20	1.90	38.0		30
14	20	1.90	38.0		30

4. 考察

4.1 電池で動作について

3.4 の実験で使用したパイプにおいて一般の二次電池で実験した .

ニッケル水素 容量 2000[mAh] , 電圧 1.5[V]

直列接続 2本 電圧 3.0[V]

$3.0[V] \times 2000[mAh] = 6.0[Wh]$

上記の計算からなら電池の内部エネルギーをロスなく瞬間的に使えたならば自励振動は観察することができる .

しかし , 上記の電池に 4.4 の実験と同じニクロム線のパイプで回路を接続した場合

- 測定電圧 2.2[V] (接続した際に電圧降下が生じている)
- 測定電流 0.2[A]

単純計算でも 0.4[W]しか発生しておらず , このヒータでは 3.4 の実験結果よりパイプは振動しないことになる . ニクロム線ヒータを低抵抗に交換をし , 電池内部抵抗と同じ抵抗値のときに最大電力を取り得る . しかし電池の内部抵抗 1~2[Ω]となり短絡状態に近い . 電池は内部抵抗があるため瞬時に電力をとることができない .

5. まとめ

- 試験管モデルでの実験 , パイプの違い等の実験から自励振動の有無はパイプ素材に依存しない .
- 巻数変化の試験から動力パイプの自励振動が起きるまで時間は巻数に比例し , 速度などには影響はない .
- 口径変化の試験から自励振動が起きるまで時間は口径の大きさに比例して , 短くなった . 速度はあまり変化しない .
- 水温変化の試験から水温が高いほど自励振動が起きるまでの時間が短くなり . 速度も速くなる . つまり , 水の持つエネルギーが大きいため自励振動までのエネルギーが少なくなつた .
- 口径形状変化試験では特にパイプ終端形状の違いに速度等、依存しない .
- ニクロム線ヒータでの実験より , 電気ヒータでの自励振動の実現可能である . つまり , 高い温度と水の状態変化の繰り返し (振動) が自励振動を引き起こす要因である .
- ニクロム線ヒータの場合 , 自励振動までの必要熱量は電池等で実現するのが難しい .
- 研究では , 最終的に電熱によって駆動できるポンポン船の製作を目指していたが , 電源である直流安定化電源の重量が大きかったために , ポンポン船に搭載して実験できなかった .