

熱で動き続けるおもちゃを作ろう！

茨城大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 神永・松村研究室
代表 会沢拓麻、小倉祥平

1. 熱機関を利用したおもちゃ

熱機関を用いたおもちゃの一つに「水飲み鳥」と呼ばれるものがある（図1参照）。2つのガラス製の球状容器をガラス管がつながり構造で、容器の中には揮発性の溶液（フロン-11）が封入されている。全体には鳥の装飾が施されており、容器は鳥の頭部、胴体、尾部に見立てられ、胴体にあたる管は、足の形状をした垂直な2本の柱に支えられ、容器の回転が可能にされている。頭部にはフェルトが巻かれ水を良く含むように作られている。

今、水飲み鳥の頭部を水で濡らす。すると水飲み鳥はゆっくりと頭を下げ始め、コップの水にくちばしを浸ける。そしてしばらくすると、頭を再び上げ、直立の状態へと戻っていく。その動きはあたかも水を飲むかのように、この動きを何度も繰り返していくのである。



図1. 水飲み鳥

2. 「水飲み鳥」が動くしくみ

水飲み鳥の動作の仕組みを、図2をもとに記す。

- ①頭部を水で濡らした状態にする。
- ②水が蒸発することによる気化熱で、頭部の温度が下がる。
- ③温度の低下により頭部の蒸気が凝集し、頭部の気圧が下がる。そして頭部と尾部の蒸気圧に差が生じ、溶液が管内を上昇する。
- ④溶液が管内を上昇することで重心が上がり、前方へ倒れる。
- ⑤倒れたことで管の下端が液面より上に出て、蒸気の気泡は管内を上昇し、溶液は下降する。
- ⑥溶液が尾部へ戻ったことで重心が下がり、鳥は元の直立状態へと戻る。

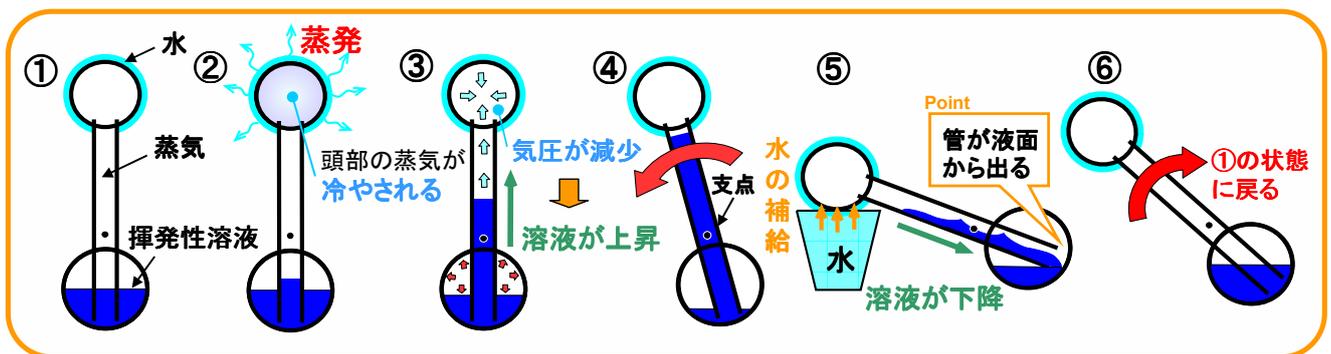


図2. 水飲み鳥のしくみ

この①から⑥のサイクルを形成する。水飲み鳥は、頭部を濡らす水が気化することによって生じる『頭部と尾部の蒸気圧差』によって、運動が引き起こされている。以上の水飲み鳥の原理から、周囲の気温・湿度が適切で、また頭部を湿らせるのに十分な水がある限り、水飲み鳥は動作を続ける。

3. 実験の目的

水飲み鳥は、頭部の水が蒸発するときの気化熱によって頭部と尾部に蒸気圧差が生じ、それによって運動が起きた。しかし、頭部を冷却する以外にも、尾部を加熱することによって『頭部と尾部の蒸気圧差』を生み出すことができ、水飲み鳥の機構を操作することが可能であると考えられる。

これまでに水飲み鳥の動作を決める要因について、既存の水飲み鳥を用いた頭部・尾部の温度測定をもとにした報告はなされているが、水飲み鳥の尾部と頭部を加熱・冷却したときの影響について報告はされていない。そこで本実験は、水飲み鳥の機構を取り入れた装置を作製し、各種パラメータの影響を本実験方法によって調べ、水飲み鳥のメカニズムを解明することを目的としている。そして、この機構を動力源として機能させることを目指し、これを取り入れた新しいおもちゃの作製を目的とする。

4. 研究方針

本研究での装置作製の概要として、図3に示したように、水飲み鳥を模擬した形状に脱気口を付け加えることで、自分たちで溶液の封入・真空引きを行えるような体系を考えた。真空引きを行うことで、溶液の沸点が下がり、温度差によって蒸気圧差をより変化させることが出来るからである。そして、真空の維持方法は脱気口に取り付けたゴムチューブを封止することで可能であると考えた。このような装置が作製できれば自分たちで真空引きが行えるので、作動液の封入量などを自在に変えられるという大きな利点が生まれる。

以上の理由から、このような体系を念頭に装置作製を行っていく。そして、これを用いて作動液の封入量・加熱量・冷却量・周期などの各種パラメータがどのように関係しているのかを明らかにし、水飲み鳥のメカニズム解明への手がかりを調べていく。更に、作製した装置を動力源として用いる場合に、その効率よく運転できる最適な条件を見つけ出し、これを用いて長時間（1時間以上）動く新しいおもちゃを作ることが我々の研究方針である。

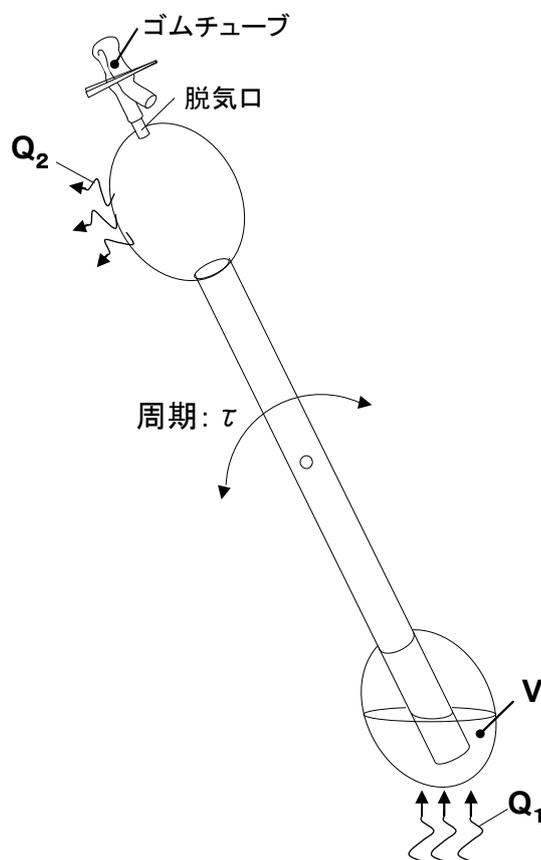


図3. 装置体系の概要

5. 既製品の調査

実験装置作製のため既製品水飲み鳥の調査を行なった。既製品水飲み鳥の寸法を図4、5に示す。

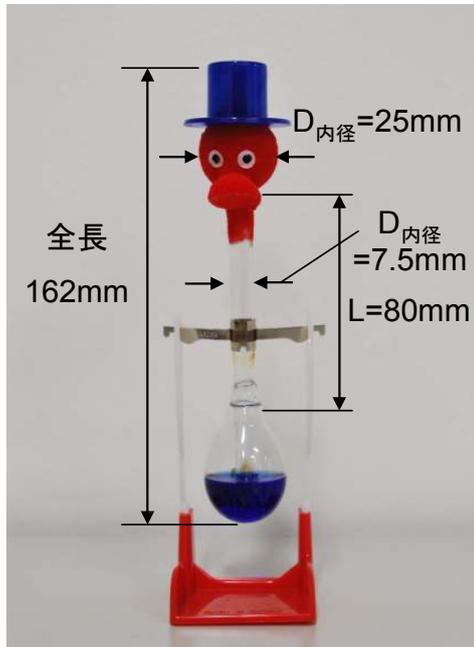


図4. 既製品寸法

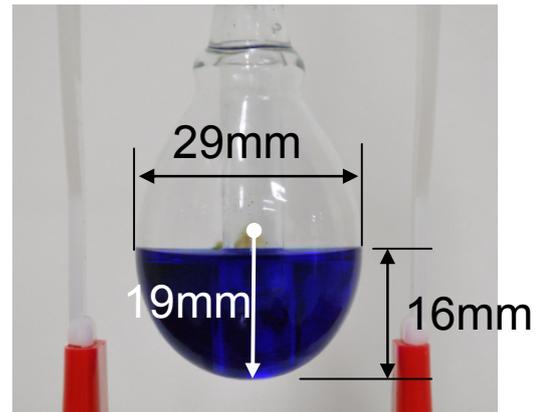


図5. 尾部寸法

この水飲み鳥に封入されている液体（以後、封入液とする）の体積 V は図5のように水飲み鳥の尾部に溜まっている状態の時を考えると、容器の形状を楕円とみなし、それを y 軸について回転させた楕円体と近似できる（図6）。これにより、溶液・容器の容量を計算し求めた。

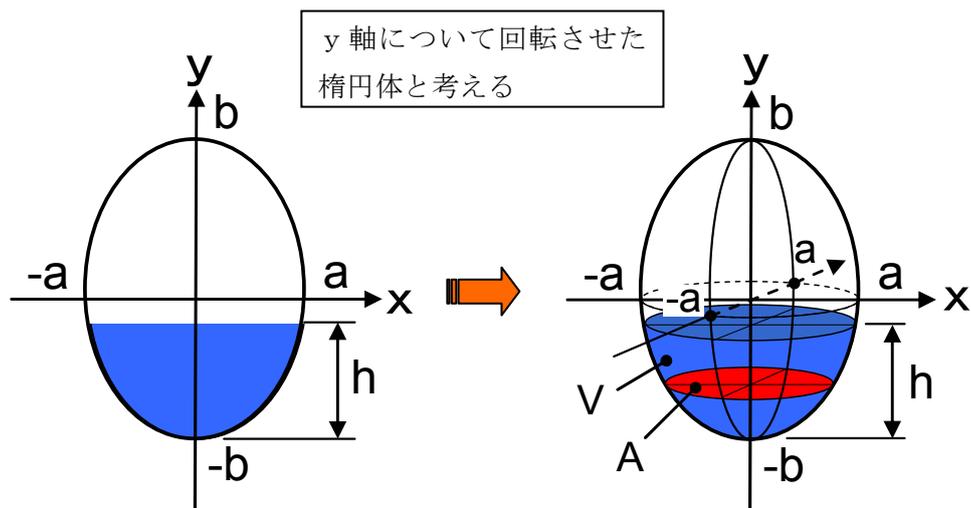


図6. 楕円体

楕円の公式

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

$$\frac{x^2}{a^2} = 1 - \frac{y^2}{b^2}$$

$$x^2 = a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right)$$

$$x = \pm \sqrt{a^2 \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right)}$$

水飲み鳥の下部容器の形状は、この楕円面を y 軸について回転させた楕円体と考えられる。よって、高さ y における断面積 A は

$$A = x^2 \pi = a^2 \pi \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right)$$

となり、これに微小高さ dy をかけた微小体積 dV は

$$dV = A \cdot dy = a^2 \pi \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \cdot dy$$

と表せられる。そして、体積 V は微小体積 dV を溶液の高さ $0 \sim h$ まで積分することによって以下のように求めることができる。(ただし、 $0 \leq h \leq b$)

$$V = \int_0^h dV$$

	積分範囲
溶液の高さ	$0 \rightarrow h$
y	$-b \rightarrow -b+h$

$$\begin{aligned} V &= \int_{-b}^{-b+h} A \cdot dy = \int_{-b}^{-b+h} x^2 \pi \cdot dy = \int_{-b}^{-b+h} a^2 \pi \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \cdot dy = a^2 \pi \int_{-b}^{-b+h} \left(1 - \frac{y^2}{b^2} \right) \cdot dy \\ &= a^2 \pi \left([y]_{-b}^{-b+h} - \frac{1}{3b^2} [y^3]_{-b}^{-b+h} \right) \\ &= a^2 \pi \left([(-b+h) - (-b)] - \frac{1}{3b^2} [(h^3 - 3h^2b + 3hb^2 - b^3) - (-b^3)] \right) \\ &= a^2 \pi \left(h - \frac{1}{3b^2} (h^3 - 3h^2b + 3hb^2) \right) \\ &= \frac{\pi a^2}{3b^2} (3hb^2 - h^3 + 3h^2b - 3hb^2) \\ &= \frac{\pi a^2}{3b^2} (-h^3 + 3h^2b) \\ V &= \frac{\pi a^2}{3b^2} \cdot h^2 (3b - h) \quad \dots(1) \end{aligned}$$

(1)式を用いることで、溶液・容器の容量が求められ、また溶液の密度から溶液の重量を計算することができる ((2)式参照)。

$$\text{重量[g]} = \text{容量[cm}^3\text{]} \times \text{密度[g/cm}^3\text{]} \quad \dots(2)$$

これらの計算式を用いることにより、装置パラメータを求め、以下の表1にまとめた。

表1. 既製品の装置パラメータ

項目	既製品
1.作動流体	フロン-11
2.密度 [g/cm ³]	1.49
3.沸点 [°C](大気圧下)	24
4.装置(空)の重量 [g]	12.4
5.装置(封入後)の重量 [g]	21.9
6.装置(フェルトが水を含んだ時)の重量 [g]	22.2
7.フェルトが含んだ水の重量 [g]	約 0.3g
8.容器内容量 [ml]	28.4
9.溶液容量 [ml]	6.4
10.容器内容量に対する溶液容量の割合 [%]	23
11.溶液重量 [g]	9.5
12.装置重量(封入後)に対する溶液重量の割合 [%]	43
13.容器内容量に対する装置重量(空)の比重 [g/ml]	0.435
14.容器内容量に対する装置重量(封入後)の比重 [g/ml]	0.770

<項目についての簡単な説明>

3. およそ地上において、溶液が液体から気体になる境目の温度です。この温度が低いほど水飲み鳥は蒸気圧差を生み出しやすと考えられます。
4. 既製品については、項目5の重量から溶液の重量を引いて求めています。
8. 容器内の空間の大きさを表します。
9. (1)式を用いて近似的に求めています。(※実験装置では投入した量を計測。6.2.1章に記述)
10. 項目9の容器の空間の大きさに対して、溶液がどれだけ占めているかを表します。
11. (2)式より求めた値です。
12. 溶液が封入されている装置全体の重さに対して、溶液がどれだけ占めているかを表します。
13. 項目8の容器内の空間の大きさに対する空の状態の装置重量の比重を表します。この値が小さいほど容器が軽く作られていると解釈できます。装置作製にあたってはこの値を参考に装置の出来栄を評価することができます。
14. 項目13と似ていますが、こちらは*封入後の装置重量の比重を表しています。この値は封入液の影響も反映されます。

6. ガラス製の装置を用いた実験

6.1 実験装置の作製

最初の装置作製にあたり、装置の中が可視化でき溶液の動きが観察できるように実験装置の素材は既製品と同じ透明のガラス製で作製した。容器は耐熱性を考慮してパイレックスを材質として使用し、ガラス製造専門の業者に依頼し作製を行った。図7はその完成した装置で、頭部には容器内が観察できるように半分ほどフェルトを巻き、冷却材を含むことによって頭部を冷却できるようにになっている。図8に装置の仕様を示す。装置の全長は317mmとなっており、既製品の約2倍の大きさである。ガラスの厚みはおよそ1.5~2mm程度となっていて、図8の球形容器の内径寸法は、それを考慮して外径寸法から引いた値となっている。なお、既製品とガラス製装置についての装置パラメータは下の表2に示してある。



図7. ガラス製装置

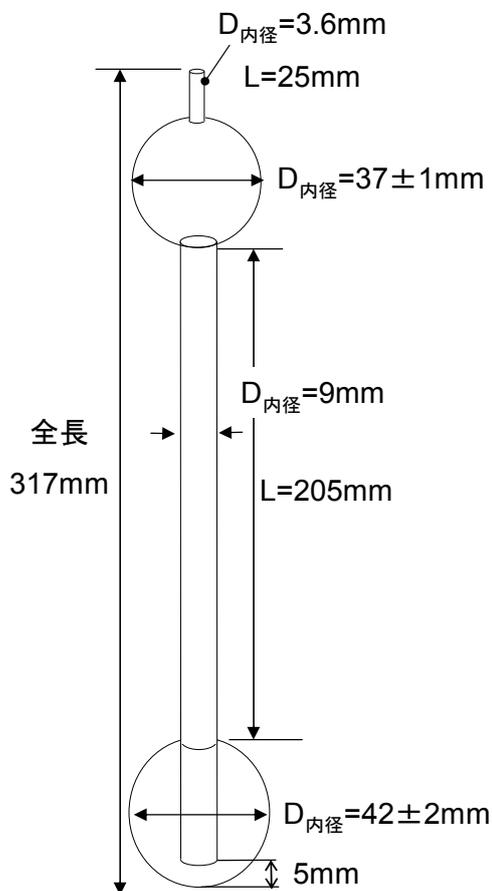


図8. 装置の仕様

6.2 基礎実験

完成した装置（図7）が動作するかの確認のため基礎実験を行なった。まず装置内部の真空引きを行い、次に装置が動作するかの実験を行なった。

6.2.1 封入液の真空引きと実験装置本体の真空引き

実験方法・実験装置

実験装置に封入する液体はエタノール（純度 99.5%）を使用した。溶液の特性は表 2 に記してある。フロン-11 の他にもジクロロメタン溶液がフロン-11 と同様に密度が高く・沸点が低い
ため、水飲み鳥に適していることが考えられた。しかし、安全面上取り扱いが難しいために本実験では使用を辞め、エタノールのみで実験を行なっていった。

エタノールの沸点は 78.4℃でフロン-11 より高いため、液体の沸点を下げ蒸気圧差をより変化させるために装置内部の真空引きを行った。実験を行う体系は図 9 に示した通りである。ポンプはドライ型真空ポンプを使用し、バルブ間にバキュームゲージを取り付けて圧力を測定しながら真空引きを行った。図から分かる通り、実験装置本体は 2ヶ所のバルブとゴムチューブを介してポンプと接続してある。そして、実験装置本体とチューブは瞬間接着剤で接着し、留めてある。

実験はまず実験装置本体にエタノールを適量入れる。次にポンプに電源を入れバルブを開き真空引きを行っていく。そして、バキュームゲージの値が 1Torr 以下になったらゴムチューブを図 10 のようにピンチコックではさみ、ハンダゴテで熱しながら締めていくことでゴムチューブを溶かし潰して装置内部の封止を行う。図 11 は封止後のチューブの状態である。

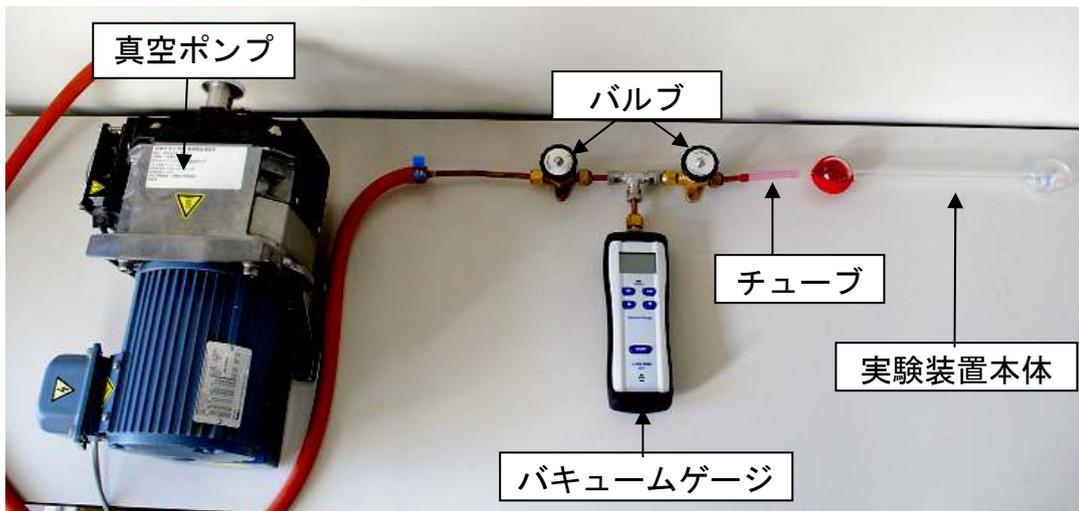


図 9. 実験装置全体図

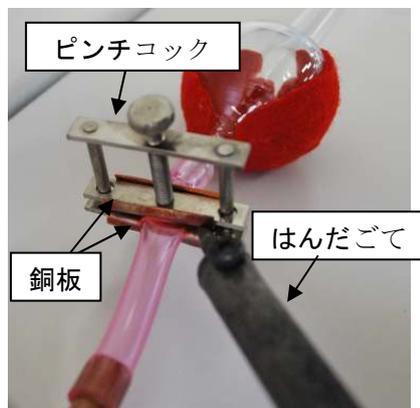


図 10. 封止作業の様子



図 11. 封止作業後のチューブ

実験装置本体の封止ではゴムチューブを溶かして潰すため最適なゴムチューブの選定を行なった。ゴムチューブはホームセンターで購入した以下の透明ホース、耐油ホース、燃料ホースの3種類である(図12)。この3種類でそれぞれ真空引きを行い、ゴムチューブの溶かしやすく、潰しやすい最も適したものを選んだ。

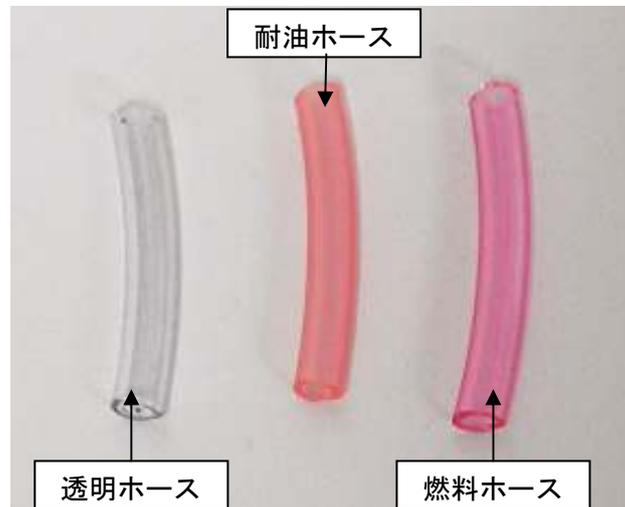


図12. ゴムチューブ

選定の結果、**燃料ホース**がこの中では最も適していた。よって、これ以降このホースを使用して真空引きを行なっていく。

真空引き後、確認のため1時間後ゴムチューブを切断すると「シューッ」と空気を引き込む音が聞こえた。3時間、6時間、1日後に切断しても同様にこの音が聞こえるため、真空引きはかなり維持できていることが考えられる。

実験装置内のエタノールの量は真空引き工程の前後で少し減少した。これは真空引きによって沸点が下がり蒸発して引かれてしまうからだと考えられる。そのため、封入した溶液容量の計測は以下の工程によって計算し求めた。

<封入量の計測方法>

- ① 装置を空の状態にし、装置重量を計測する。(尾部に溜まった溶液は加熱によって蒸発させ、頭部のフェルトはドライヤーで乾燥させる)
- ② 少し多めに溶液を投入して封入を行った後、装置全体の重さを計測する。
- ③ ゴムチューブの単位長さあたりの重さを調べておく。
- ④ ①～③で求めた値を用い、②.封入後の装置の重さから、①.装置重量と③.で求められる封止に用いた分のゴムチューブの重さを引くことで、溶液重量が求められる。
- ⑤ 溶液容量はエタノールの密度と溶液重量から算出し求める。

6.2.2 実験装置の動作確認

実験方法・実験装置

実験装置の真空引きの次にこの装置が動作するか確認を行った。実験装置にはエタノールが封入されてある。尾部の加熱はお湯（約 70℃）を用い、頭部の冷却は氷水（約 1℃）を用いて行った。図 13 に実験装置の全体図を示す。

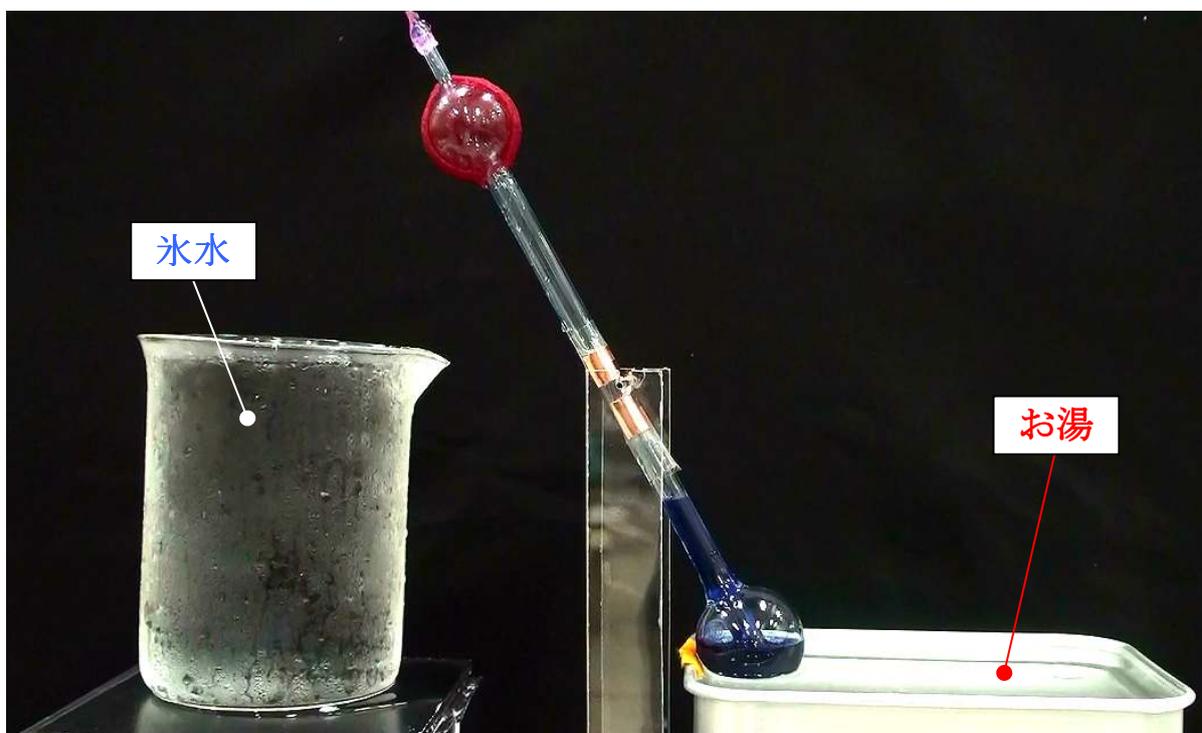


図 13. 実験装置の全体図

結果・考察

実験の結果、次のことが確認できた。まず加熱によって実験装置内で封入液が上昇していくのが確認できた。そして液が上昇することで装置が前方に倒れ、その後再び元の位置に戻った（図14に封入液が上昇し装置が傾いている図を示してある）。しかし、様々な封入量で実験を試したが、理想となる動きをさせることができなかった。封入量が少ない場合は、前方に傾いた際、倒れた角度が浅い段階で胴体にあたる管下端が液面から出てしまい、溶液と蒸気の逆流が起り、コップに着くまで倒れることができなかった。逆に封入量が多い場合にはコップまで倒れることは出来ても、頭部に溶液が溜まってしまいきれいに直立の状態に戻すことができなかった。この原因として胴体にあたる管下端と尾部容器の隙間が大きすぎたことが考えられる。これらの理由から、この装置のコップまでしっかりと倒れることを前提にした最適な封入量は23.9[ml]となり、以下の表2に装置パラメータをまとめた。

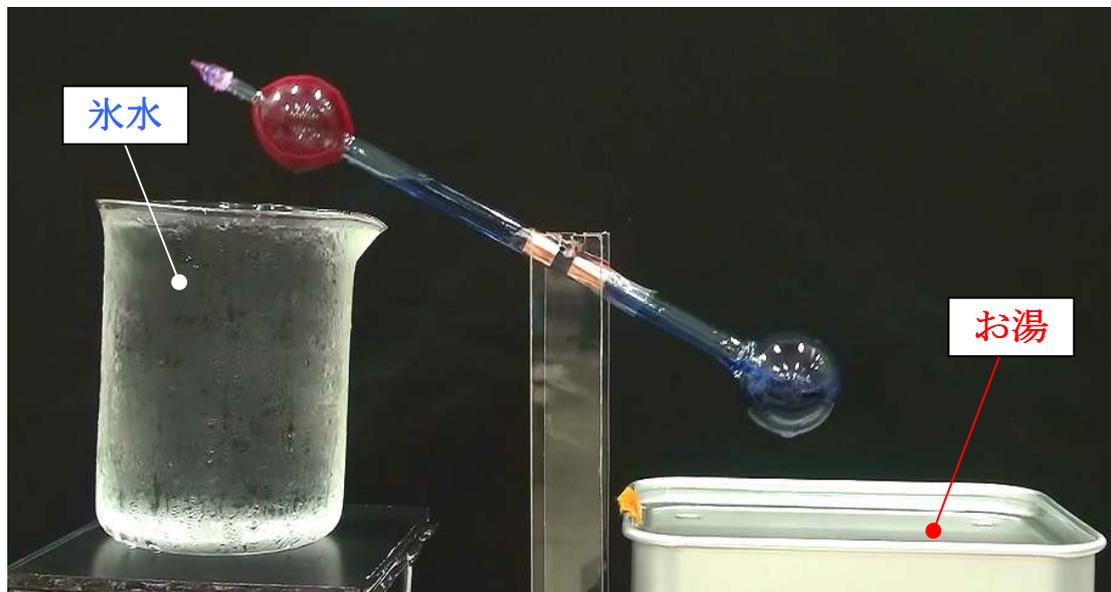


図14. 傾いたときの様子

ガラス製水飲み鳥について以下の装置パラメータ比較から評価することができる。まず、項目 10 において既製品と比べて容器内容量に対する溶液容量の割合が大きくなってしまっていることが言える。これはコップまでしっかりと倒れさせるためには封入量を多く投入しなければならない、管下端と尾部容器の隙間に原因があると考えられた。また、項目 13 において、ガラス製はこの値が高く、装置が軽く作れていないことが言える。そのため、封入液の重心移動の影響が小さくなってしまい、動力源としての効率が悪いことが考えられる。

表 2. 装置パラメータ

項目	既製品	ガラス製
1.作動流体	フロン-11	エタノール
2.密度 [g/cm ³]	1.49	0.789
3.沸点 [°C](大気圧下)	24	78.4
4.装置(空)の重量 [g]	12.4	78.9
5.装置(封入後)の重量 [g]	21.9	98.4
6.装置(フェルトが水を含んだ時)の重量 [g]	22.2	99.1
7.フェルトが含んだ水の重量 [g]	約 0.3g	約 0.7g
8.容器内容量 [ml]	28.4	75.9
9.溶液容量 [ml]	6.4	23.9
10.容器内容量に対する溶液容量の割合 [%]	23	32
11.溶液重量 [g]	9.5	18.9
12.装置重量(封入後)に対する溶液重量の割合 [%]	43	19
13.容器内容量に対する装置重量(空)の比重 [g/ml]	0.435	1.040
14.容器内容量に対する装置重量(封入後)の比重 [g/ml]	0.770	1.297

改善点

- ・ 胴体にあたる管下端と尾部容器の隙間を小さくする。
- ・ 装置をより軽く作る。

この 2 つの点に注意し、次回装置作製に役立てる。

7. 銅製水飲み鳥の実験

7.1 試作品作製・真空引き実験

新しい装置材料として銅を取り入れてみた。銅は熱伝導率が高く、加熱部の熱を効率よく伝えてくれると考えたからである。また、銅は加工が比較的容易であることもその理由の一つである。まず銅製水飲み鳥を作製する前に、簡単に銅製容器の試作品を作製し（図 15、16 を参照）、ガラス製実験装置と同じように真空引きの実験を行なってみた（図 17 参照）。その結果、問題なく真空引きを行うことができたので、次に銅での実験装置作製に取り掛かった。なお詳しい作製方法は第 10 章に記してある。



図 15. 試作品 (加工前)

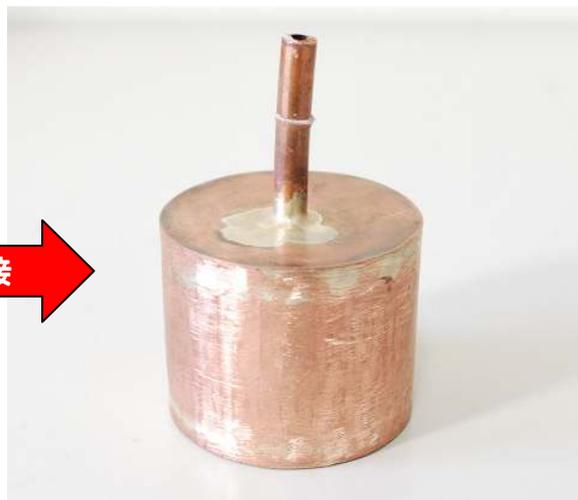


図 16. 試作品 (加工後)



図 17. 実験装置全体図

7.1 実験装置本体の作製

図 18 に今回新たに作製した装置を示す。その装置仕様は図 19 の通りである。尾部は球形ではなく円柱型となっている。この形状にすることで尾部の底面にラバーヒーターを取り付けることを可能にした。これにより湯煎実験と比べより加熱量をコントロールすることができる利点がある。また湯煎と比較してヒーター加熱では常時加熱を受けているので、実際の水飲み鳥の条件に近いことが考えられ、水飲み鳥のメカニズム解明には適していると考えた。頭部の形状は円柱型からできているが、頭部に流れ込んだ溶液がしっかりと戻るよう、胴体と接続する面が球状になっている。そして、前章のガラス製の改善点に基づいて、尾部の底と管との隙間を 5mm から 3mm に変更した。また、銅は比重が大きいため厚みを 0.3~0.5mm と薄く加工し、更に装置を大きくすることで、装置パラメータ・項目 13 を小さく抑えることを狙って作製を行った。装置の詳しい作製方法については第 10 章に記載した。



図 18. 銅製装置

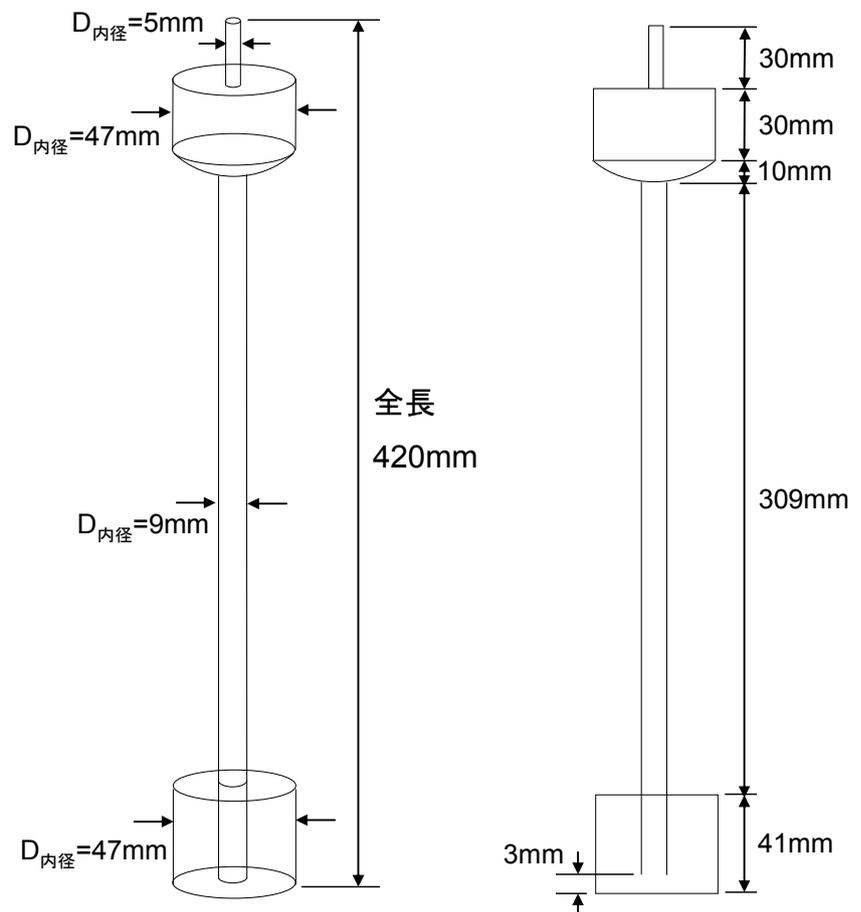


図 19. 装置の仕様

7.2 実験

実験方法・実験装置

作製した銅製の実験装置を用いた実験装置全体図を図 20 に示した。実験装置本体の頭部、管部、尾部の 3 箇所 (図 20 の温度測定ポイント) にそれぞれ温度測定のため K 型熱伝対を取り付けた。そして、尾部の底にはシリコンラバーヒーター (丸型) を取り付けた (図 21、22)。封入する液体はエタノール (純度 99.5%) を使用した。実験は溶液の封入量、ビーカーに入れる冷却水の種類、ヒーターの加熱量を変化させて周期や各部の温度変化を調べた。

実験方法における周期測定にはストップウォッチを用いて測定を行った。測定開始はヒーター電源を入れてから各部の温度が定常になってから測定を始め、測定時間は 1 時間とした。これは実験装置が 1 時間以上動くこと研究方針としているからである。

実験は風の起こらない静かな室内で室温、湿度、気圧をほぼ一定に保って行った。

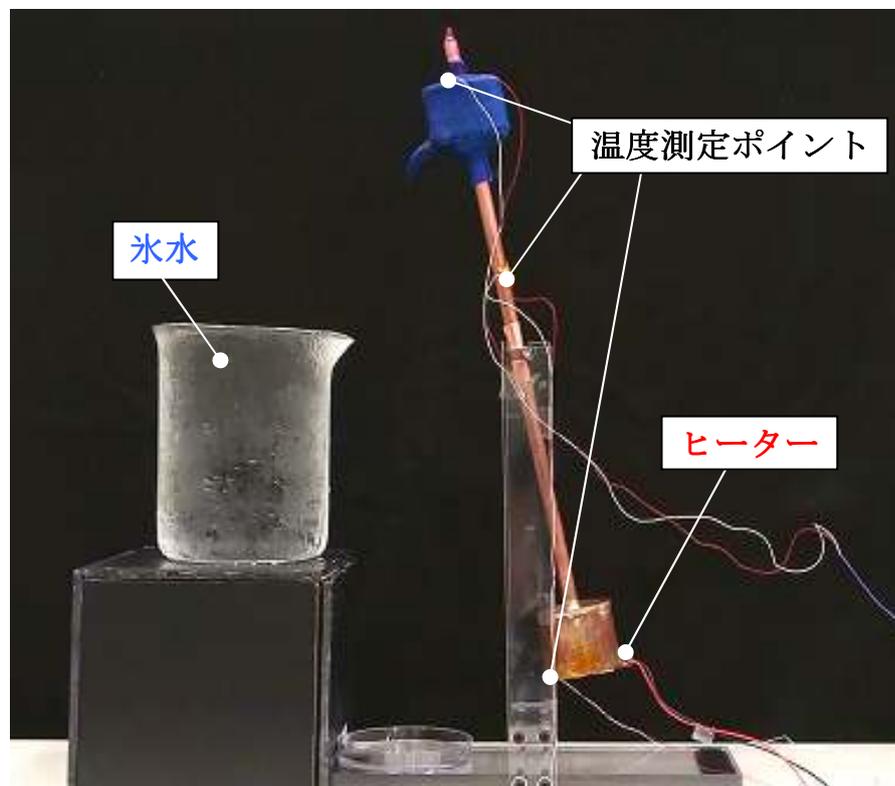


図 20. 実験装置全体図

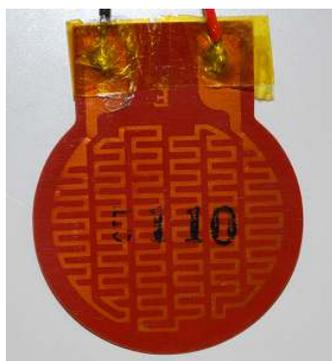


図 21. ラバーヒーター加熱面



図 22. ヒーターを取付けた尾部底面

7.3.1 最適な溶液封入量の決定

実験条件

実験装置本体の頭部の冷却には氷水(約 1°C)を使用し、尾部の加熱はヒーターを 5W に固定して行った。封入液の封入量の条件は装置が動く範囲を確認しながら模索し、27.5~41.0ml の範囲を 5 点調べ、適切に動きかつ出来るだけ効率的に動く範囲を調べた。

結果

実験装置はガラス製の時よりもスムーズに動くことが確認できた。まず、下の図 23 に実験における温度測定結果を示した。図から頭部・胴体の温度は 30°C 付近で不規則に変化しているが、頭部温度は周期的にほぼ同様の変化量で変化していることが分かる。ヒーターの加熱によって徐々に温度が上がり、そして倒れて冷却水に触れることで冷やされ温度が急激に低下していることが分かる。装置の運転にあたってはこのような温度変化を繰り返していることが温度測定から明らかになった。

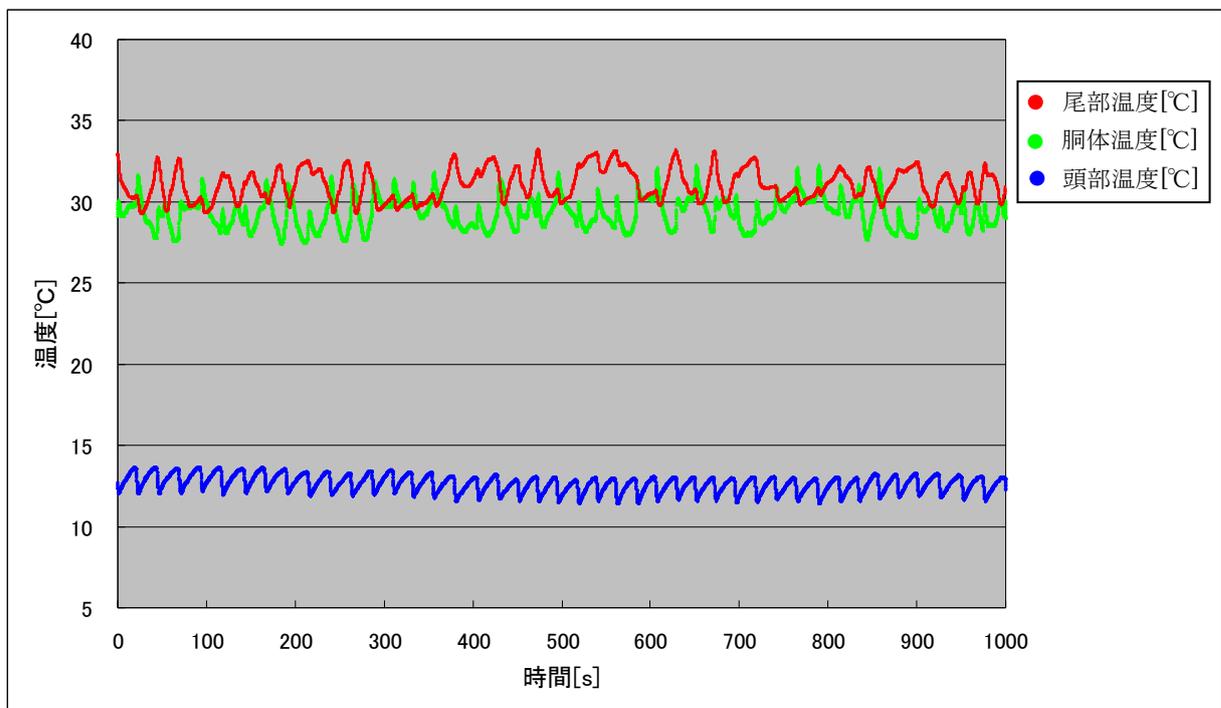


図 23. 温度測定結果

封入量 : 34.2[ml]

次に、各封入量における平均周期を表 3 にまとめた。周期の早さだけ比較すると封入量が少ないものの方が早いことがわかる。しかし、より適切に・効率良く動くという点を考慮すると封入量 34.2ml が最も適していることが分かった。しかし、封入と真空引き工程において封入量を細かい精度で閉じ込めることが困難であるため、これより封入量の最適な範囲を 33~34.5ml と定め実験を進めていく。

加熱量と周期の関係を図 24 に示した。この近似曲線より以下の近似式が得られた。

$$y = 0.037x^{1.87} \quad \dots (3)$$

表 3 封入量ごとの周期

封入量[ml]	27.5	29.4	34.2	36.1	41.0
平均周期[s]	17.9	21.5	28.3	29.7	39.0

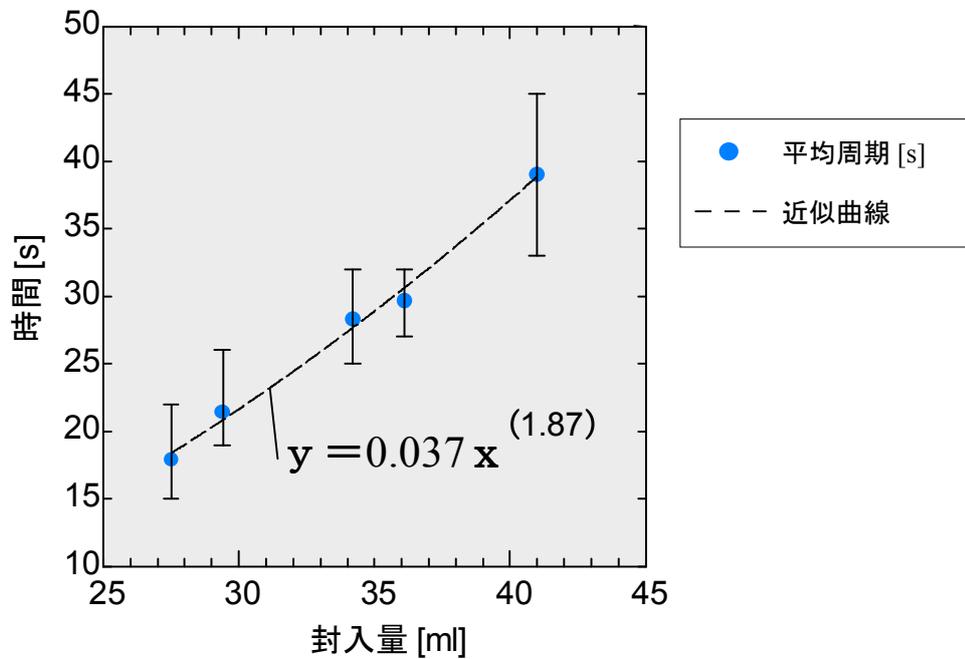


図 24. 封入量と周期の関係

表 4 に装置パラメータを記した。項目 13 からわかる通り、銅製では容器の厚みを 0.3~0.5mm 程度に抑え、またサイズを大きめに作製したことで、比較的軽く作製できたと評価できる。また、管下端と容器の隙間を小さくしたことで、無駄に溶液を投入する必要がなく、項目 10 における容器内容量に対する溶液容量の割合を既製品と同じくらいに抑えることができたと考えられる。これらの理由から良く動く装置ができたのだと考えられる。

表 4. 装置パラメータ

項目	既製品	銅製	ガラス製
1.作動流体	フロン-11	エタノール	エタノール
2.密度 [g/cm ³]	1.49	0.789	0.789
3.沸点 [°C](大気圧下)	24	78.4	78.4
4.装置(空)の重量 [g]	12.4	121.0	78.9
5.装置(封入後)の重量 [g]	21.9	149.6	98.4
6.装置(フェルトが水を含んだ時)の重量 [g]	22.2	151.8	99.1
7.フェルトが含んだ水の重量 [g]	約 0.3g	約 2.2g	約 0.7g
8.容器内容量 [ml]	28.4	149.2	75.9
9.溶液容量 [ml]	6.4	33~34.5	23.9
10.容器内容量に対する溶液容量の割合 [%]	23	22~23	32
11.溶液重量 [g]	9.5	26~27.2	18.9
12.装置重量(封入後)に対する溶液重量の割合 [%]	43	17~18	19
13.容器内容量に対する装置重量(空)の比重 [g/ml]	0.435	0.811	1.040
14.容器内容量に対する装置重量(封入後)の比重 [g/ml]	0.770	1.003	1.297

7.3.2 冷却水の選定

実験条件

次に冷却水の影響を調べる実験を行った。封入量は 34.4ml、ヒーター加熱量は 5W で行った。冷却水は氷水、水（常温）、エタノール（常温）を使用した。

結果

表 5 に各冷却水に対する平均周期をまとめた。図 25 は冷却水ごとの各周期を示している。この結果から氷水が最も早く動くことが分かった。

今回の冷却材が氷水の条件での平均周期は 23.5 秒となり、7.2.2 の「最適な封入量を決める」実験において求めたグラフより少し早くなっている。これは加熱部に断熱材を図 26 のように押し付けることでヒーターの接地が良くなり、また断熱効果が高まったため、封入量決定実験と比べて少し早くなっていると考えられる。しかし、封入量決定実験は一貫してヒーターを同じ設置方法で行ったので最適な封入量決定には影響は無いと考え、次項加熱量実験に移った。

表 5. 各冷却材における平均周期

冷却水	氷水(約 1°C)	水(常温: 約 20°C)	エタノール(常温: 約 20°C)
平均周期[s]	23.5	29.2	25.1

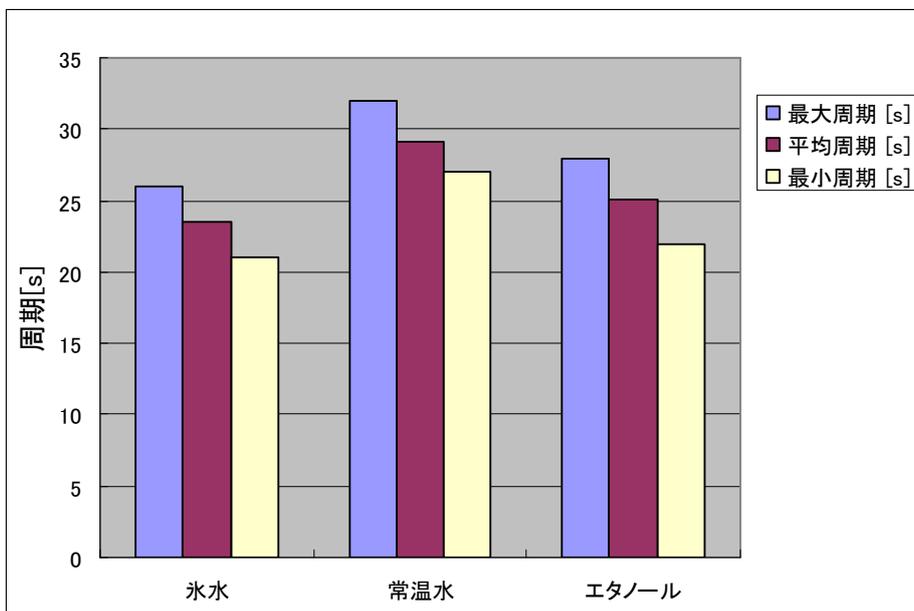


図 25. 冷却材と周期の関係



図 26. ヒーターの接地強化

7.3.3 加熱量の比較実験

実験条件

次に加熱量の影響を調べる実験を行った。冷却水は氷水、封入量は 34.4ml で、ヒーター加熱量の条件は 3~9W の 4 点で行った。

結果

表 5 に各加熱量に対する平均周期をまとめた。平均周期は加熱量が高くなるにつれて早くなることが分かる。これは加熱量が高いことで尾部容器内の蒸気圧が早く高まり、溶液が速く上昇することで、周期が早くなっていると考えられる。

図 27 に加熱量と周期の関係のグラフを示した。このグラフの近似曲線より以下の近似式が得られた。

$$y = 447.04x^{-1.88} \quad \dots (4)$$

表 6. 各加熱量に対する平均周期

加熱量[W]	3	5	7	9
平均周期[s]	56.3	22.3	11.4	7.2

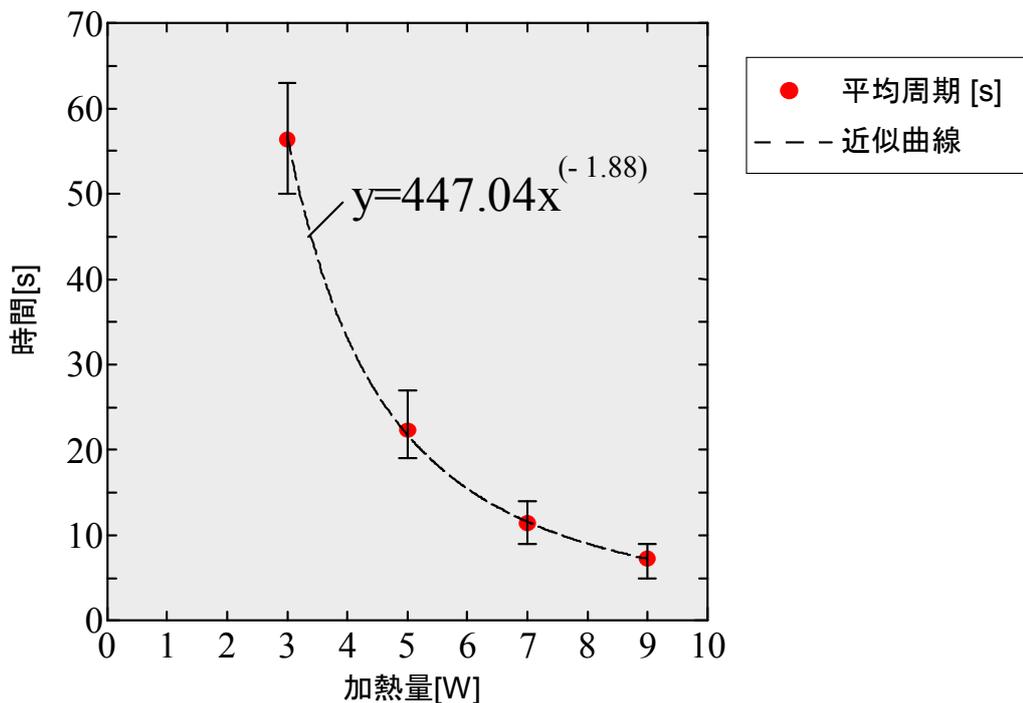


図 27. 加熱量と周期の関係

図 28 は加熱量と温度の関係のグラフである。グラフより加熱量が高くなるにつれて尾部・胴体は温度が上昇し、頭部は減少して行くことが分かる。尾部・胴体は、加熱量が高くなると容器がそれだけ熱量を多く受けとることになり温度が高くなると考えられる。逆に頭部温度が減少しているのは、加熱量が上がると周期が早くなり、それだけ冷却水（氷水；約 1℃）に頭部を浸す回数が増えることにより頭部が冷やされたからだと考えられる。

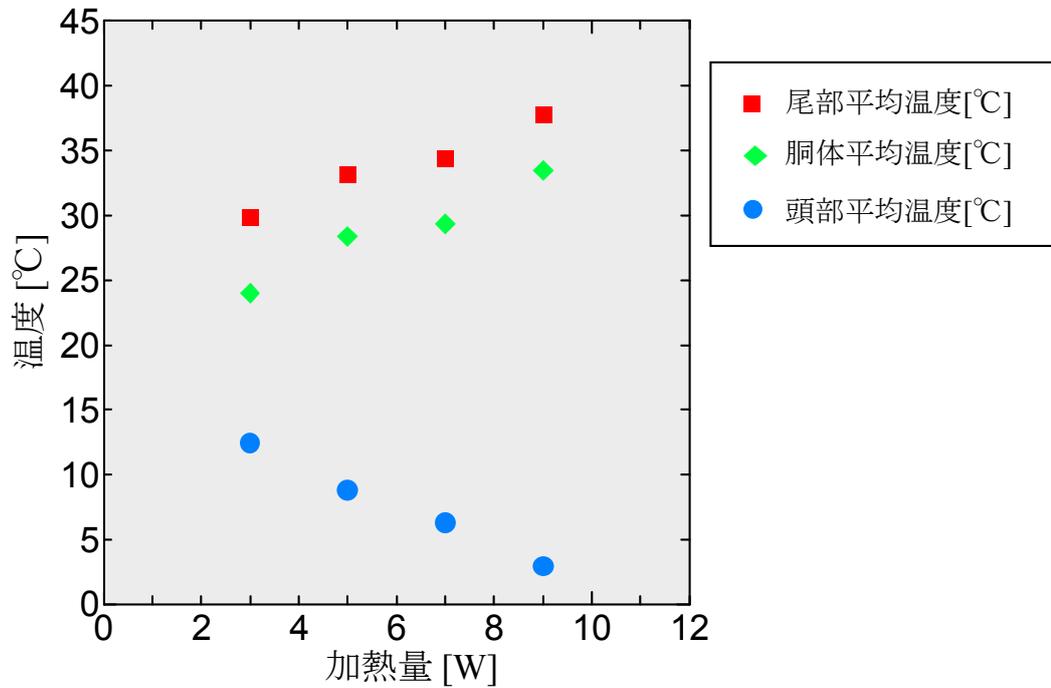


図 28. 加熱量と温度の関係

7.3.4 実験のまとめ・考察

それぞれの実験からおもちゃを作製するにあたり最適な条件を表7のように求めた。

表7. 最適な条件

封入量[ml]	冷却水	加熱量[W]
33~34.5	氷水	* $3W \leq Q \leq 9W$

* $3W \leq Q \leq 9W$ は、3~9W の範囲で1時間の連続運転が実証できたために用いた範囲で、より動くおもちゃを作製するには、9W以下で出来るだけ加熱量が多いことが望ましいと考えられる

この条件の範囲で装置を作製することで、効率良く・長時間運転することが可能であると考えられる。

J.Guemez らは既製品水飲み鳥を用いて頭部の水の蒸発量と湿度の関係を調べる実験を行っている。そこでフィックの法則より以下の実験式を提案している。

$$y = \kappa(100 - H)^{-\beta} \quad \dots (5)$$

κ 、 β : 実験より得られる定数、 H : 湿度。湿度が75%以内では $\kappa = 9.44$ 、 $\beta = 1.82$

本実験で得られた実験式(4)は(5)式と式の形が類似していて、指数も近い値をとっている。(3)式に関する(5)式と形が類似しており、指数も1.87と絶対値で見ると近い値であり、興味深い結果である。これらのことから指数 β があるパラメータ（容器の形状・封入液など）に依存していることが予想できる。

この影響するパラメータを判別・特定するには更なる対照実験を行う必要があるだろう。封入液を変更したり、装置の形状などを変更した実験を行い、近似を行うことでどのパラメータがどう影響しているのかを求めることができると考える。

8. おもちゃの作製

8. 1 おもちゃの考案・作製

今回銅製の装置を動力源にしておもちゃを作るにあたって、湯煎実験からヒントを得、熱源をお湯から受けるような体系を考えた。そして、図 29 に示したような、水飲み鳥が動力源となって進む船「お風呂で遊べるおもちゃ」を考案し作製を行った。図 29 に示した船は、材質が発泡スチロールでできており、冷却材を置くためのコップと水飲み鳥を支える柱を所定の位置に取り付けたシンプルな作りである。また、動力源となる水飲み鳥には、図 30 に示したように下部容器の底面にヒレをつけ、それを介して動きを推進力に変える作りになっている。ここでヒレの取り付け方であるが、ただヒレを固定するだけでは前進と後退を繰り返すだけになってしまう。よってそれを解決するために、装置がコップ方向に倒れるときに負荷が掛かり、直立状態に戻りヒレが入水する時には負荷がかからないような、可動式の作りになっている。

船の作製

使用した材料

- ・ 発泡スチロール板（厚み 5～10mm）
- ・ 発泡スチロールの円柱棒
- ・ コップ
- ・ 針金
- ・ ビニールテープ

<作製方法>

- ① 最初に船の底板を切り出す
- ② 円柱棒を適当な長さに切り出し、それらを所定の位置に接着する。（ここにコップ・針金がセットされます）
- ③ 円柱棒が上手く隠れるように、周りに板を張り合わせて船の形にする。
- ④ コップ・針金を円柱棒のある位置に固定する。
- ⑤ 最後にビニールテープで補強・装飾を施して完成。

ヒレの作製

使用した材料

- ・ 銅板（5×10mm 肉厚 0.5mm）
- ・ 下敷き（プラスチック製）

<作製方法>

- ① 下敷きを適当な大きさにカットする。
- ② 銅板を 90℃程度に曲げ、ヒレの付け根となる位置に固定する。
- ③ 最後にカットした下敷きを所定の位置に固定して完成。



図 29. お風呂で遊べるおもちゃ



図 30. ヒレの取り付け方

8. 2 船の運転

実験体系は図 31 に示したように、水を張るための水槽、投込みヒーター、ログサーモを用意した。水槽にはった水はヒーターの加熱によってお湯（約 42℃）に変えられ、この熱源を利用して船を運転した。今回ヒーターの加熱にあたっては、実験実施チームに選ばれた際に頂いたログサーモを使用してヒーターの出力を制御して行った。この装置は熱電対でお湯の温度を感知しながらヒーターの出力を制御してくれるので、設定した温度に簡単に定常化させることができ、実験を大変スムーズに進めることが出来た。

機器名	主な仕様
ログサーモ DGL0100 (株)八光電機製作所	最大負荷： 1 k W 制御方法： ON/OFF 制御
投込みヒーター BWA1110 (株)八光電機製作所	定格消費電力： 1 k W

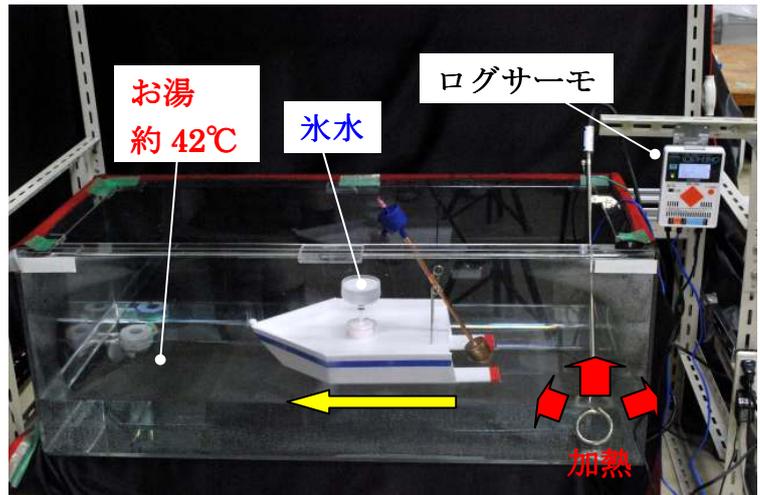


図 31. 実験体系

お湯のセットが完了したら、次に船を浮かべコップに氷水を入れ、水飲み鳥の頭部にしっかりと水を染みこませてから、船に取り付けた。下部容器が入水しお湯から熱を受けてしばらくすると、水飲み鳥は周期的に運動を始め、ヒレを介して船を進めることに成功した。ヒレが入水するときのヒレの動きは図 32 に示してある。作製の狙い通りにヒレが入水する時に負荷がかからないようなヒレの動きが実現でき、水飲み鳥の動きを上手く推進力に変えられていることが確認できた。船の動きについては動画がアップされているのでそちらを参考にして頂きたい。

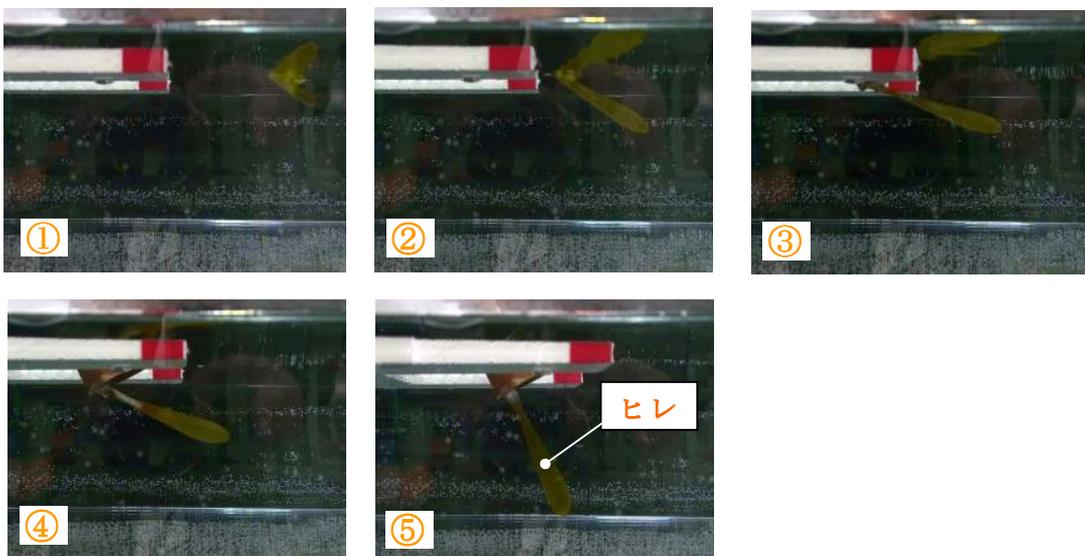


図 32. 入水する際のヒレの動き

今回の船のおもちゃの水飲み鳥は、実験によって求めた最適な条件下で行った。実験条件は下の表 9 に示した通りである。

表 9. 実験条件

封入量[ml]	冷却材	加熱量[W]
33.6	氷水	湯煎：4 2℃

動画から分かる通り、今回の船における水飲み鳥の動きは周期が約 13 秒となっている。これは実験で求めた最大加熱量 9W における平均周期：7.2 秒よりも長い。つまり、加熱を与える時間に違いはあるが（湯煎ではお湯に触れている時だけ）、最大 9W で 1 時間の長時間運転が可能であったように、今回のお風呂で遊ぶおもちゃも 1 時間の連続運転が可能であることが予想できた。

そして、実験からも確かに 1 時間という目標時間を連続的に動くことを確認でき、この研究タイトルでもある「熱で動き続けるおもちゃ」を作製することが達成できました！

ここにて、本研究方針である、水飲み鳥の機構を取り入れた装置の作製・その装置を用いた各種パラメータの影響の調査・そして装置を動力源として用いた熱で動き続ける新しいおもちゃの作製、これらすべてを達成し、本研究を成功とします。

おもちゃの紹介

このおもちゃは作動液がエタノールと人体に害の少ない物質でできており、また、容器がガラス製ではなく銅製であるために割れて破片が飛び散るといった心配がない。そのため、子供にも安心して遊ばせることが出来るおもちゃである。また、お風呂の温度でも十分に動かすことができるので、比較的遊びやすいおもちゃである。冷蔵庫から氷を取り出しておもちゃと共に風呂に向かえば、それだけで遊べてしまうのである。さらに、今回の実験で実証できたように 1 時間という長時間の運転も可能なので、長湯な方にもしっかりと対応し、飽きさせることのない作りとなっている。



図 33. お風呂で遊ぶおもちゃ

今回の研究にあたっては、安全面を考慮しエタノール以外での実験が行えなかったが、違った作動液にかえることができれば、同じ条件下でもより動くおもちゃが作製出来るかもしれない。また、いろんな大きさ・条件のおもちゃを作製し、競争させても面白いだろう。

9. まとめ

銅製の水飲み鳥の作製に成功し、頭部を冷却すると共に尾部を加熱するという新しい方法で各種パラメータの影響について調べた。そこから明らかになった事柄を以下にまとめる。

- 封入量が少ない方が装置は早く動く。しかし、装置が適切に動く範囲でなければならぬので、その両方が成り立つ効率が良い封入量はある程度決定される。
- 冷却材は、氷水・エタノール・常温水の順で装置が良く動くようになる。
- 加熱量が高くなるにつれて周期は早くなる。そして、本実験では周期と加熱量の関係が $y = 447.04x^{-1.88}$ (y : 周期、 x : 加熱量) と表わせた。
- 加熱量が高くなるにつれて胴体・尾部温度は上昇するが、頭部温度は逆に減少する。これは加熱量が高くなるにつれて周期が早くなり、冷却水に触れる回数が増えるためであると考えられる。

また、よく動く装置を作製するためのポイントを以下にまとめる。

- 胴体にあたる管下端と尾部容器の隙間をあまり空けすぎない。本実験では 3mm 程度で上手く機能させることが出来た。
- 容器を出来るだけ軽くなるように作製する。

最後に今回の実験の動画を 3 本載せてありますのでご覧になってください。

1. 加熱量の比較を行った実験の動画 (ファイル名 : 加熱量比較実験)
2. 作成した船の動画 (ファイル名 : ship)
3. ガラス製の実験装置を用いて行った実験の動画 (これはおまけです)
(ファイル名 : ガラス製装置)

謝辞

本実験は、(株)八光および(株)八光電機製作所より助成を賜りました。加えて、知識を高める貴重な場を提供して頂き、ここに感謝の意を評します。また、ガラス製品の作製に協力して下さい(有)古川理工様、並びテーマ考案の際にアドバイスを下さった先生方、研究室の皆さんに心より感謝を申し上げます。

参考文献

- (1) 熱機関の教材化—水飲み鳥の作動を決める要因—
物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 (25)、 15-16、 2008-08-04
- (2) 常温熱機関(水飲み鳥)の温度測定 : 物理教材化のために
物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 (26)、 66-67、 2009-08-04
- (3) J.Guemez、C.Fiolhais :
“Experiments with the drinking bird”、Am.J.Phys.71、 pp1257-1263

10. 銅製水飲み鳥の作り方

今回の銅製水飲み鳥の作製では図 34 に示したように8つのパーツを組み合わせることで作製を行った。図 34 は左から赤枠で囲ったように尾部・頭部・胴体のパーツとなっている。尾部と頭部では銅パイプと銅板を用い、そして胴体は銅管を用いて作製した。銅板には管を通すための穴を開けており、頭部容器の底板は、頭部に溜まった溶液が管にしっかりと落ちるように、ハンマーで叩いて丸みをおびたフォルムに形成してある。

使用した材料

- ・ 銅パイプ $\Phi 47 \times 51\text{mm}$
- ・ 銅管 $\Phi 9 \times 10\text{mm}$ (胴体)
 $\Phi 5 \times 6\text{mm}$ (脱気口)
- ・ 銅板 肉厚：0.5mm

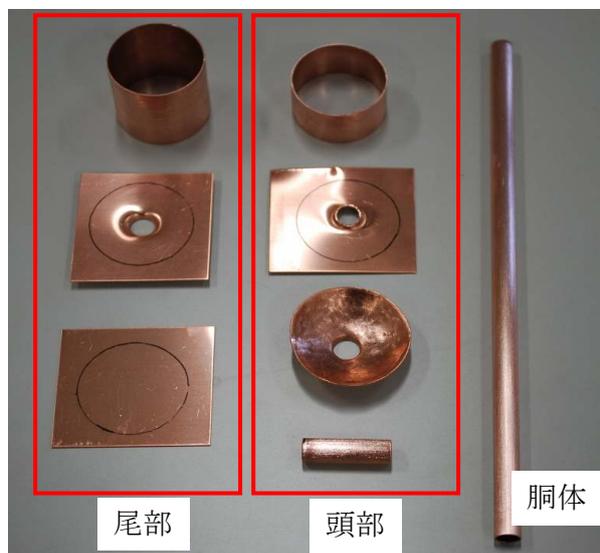


図 34. 各部パーツ

尾部・頭部の銅パイプは図 35 にあるように肉厚が厚いため出来るだけ軽く作るためにグラインダーで研磨して薄く加工した。この工程は、実験結果にも示された通り、装置を出来るだけ軽く作ること装置の効率化をはかるためである。そして、研磨によって厚みを 0.3~0.5mm 程度まで薄くすることが出来た。また、胴体にあたる銅管もヤスリがけを行い、出来るだけ薄く加工した。

	加工前	加工後
横から見た写真		
上から見た写真		
肉厚	2mm	0.3~0.5mm

図 35. 研磨前後の比較

<溶接>

はじめに、以下のものがが必要です。

用意するもの

- ・ 溶接する材料
- ・ 銀ロウ
- ・ フラックス
- ・ ガスバーナー
- ・ 及びそれに付随する遮光眼鏡や手袋など



図 36. 溶接の様子

溶接の手順

- ①最初に溶接する箇所の銅板にヤスリがけをし、細かい傷をつけておく。こうすることで、毛細管力が生まれ銀ロウが浸透しやすくなる。
 - ②次に溶接を行う箇所にフラックスを適量塗り、溶接物同士をくっつけて固定する。
 - ③ガスバーナーで溶接箇所を加熱してフラックスを溶かしていく。
 - ④フラックスが溶け出したらそこに銀ロウを投入して、銀ロウを溶かし広げていく。
 - ⑤溶接が完了したらゆっくりと冷ます。
 - ⑥溶接物が冷えたら、残りカスをヤスリで削りきれいにする。
- ①～⑥の工程を繰り返し、装置全体を組み上げていく。

溶接のポイント

I. 溶接する順番

頭部・尾部の作製 → 尾部と胴体の溶接 → 頭部と胴体の溶接

溶接の順番は大まかに上の手順で行うことをおすすめする。溶接で最も重要となるのが、胴体にあたる管と尾部の溶接であるからである。これは実験結果でも示したように、管と下部容器の隙間の距離がとても重要になるからである。そのため、溶接の際にズレなどのミスをなくすために尾部と胴体の溶接を先にすることが好ましい。また、頭部・尾部容器の作製では、銅板に穴の開いている、または穴の大きい板を先に溶接することをおすすめする。これは図 37 に示したように、溶接した内側にはフラックスの残りカスが堆積するのでこれを取り除くためである。先に溶接した板に対しては紙ヤスリで簡単にきれいにでき、穴の開いていない板を溶接した際の残りカスは、一枚目に開いてある穴を通して金属棒で削り取ることができるからである。

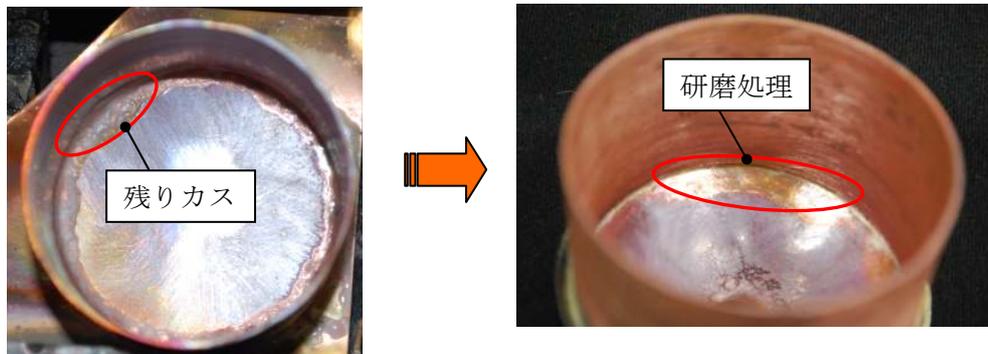


図 37. 溶接後と研磨後

II. 加熱量

銅は熱伝導性が極めて高い。そのため、如何にして銅の温度を上げられるということが溶接のポイントになる。そこでまず、溶接物と土台との接地面を少なくすることが一つのポイントである。接地面を少なくすることで銅から土台への放熱を抑えることができ、銅をより高温にできるからである。また、ガスバーナーも強力なものが好ましい。今回の溶接に使用したものは、鉄溶接用でかなり強力なものを用了。今回、この強力なガスバーナーによって溶接箇所を局部的に加熱することが出来たため、複数ヶ所の溶接を実現できたのかもしれない。

溶接後

- ・外側の余分な銅板を切り、再びグラインダー・ヤスリで外側をきれいに研磨し、仕上げる。
- ・最後に頭部にフェルトを巻き完成。

装置作製の改善案

今回の作製方法では作製時間の大半を銅パイプの研磨に費やすことになり、大変な時間が掛かった。その改善策として肉厚の薄い銅パイプを手に入れる、または別の方法として銅板から作製する方法が考えられる。銅板から作る場合には予め肉厚の薄いものを用意し、それを丸めて溶接することによって円筒容器を作り出す方法である。これが可能であれば、製作をより簡単に、短時間で出来るかもしれない。

実験には間に合いませんでしたが、ミニチュア版も作製してみました！



図 38. 作製した銅製水飲み鳥