

研究論文

常温熱機関「水飲み鳥」の周期的動作

— 高校理科「課題研究」の教材にするために —

桐山 信一\*

水飲み鳥は熱機関であることが、頭部と胴体の温度測定で実験的に確認された。J. Guemezらの理論では、 $H$ を相対湿度とすると、その周期は  $(100 - H)^{-1}$  に比例するが、周期データは  $(100 - H)^{-\beta}$  に比例する。ここで、 $\beta$  は1より大きい。彼らは、空気対流の影響であると推論する。我々の実験では、対流の直接的影響は考えにくく、液柱の上昇に関係する要因、実測している周期と熱学上の周期が異なることによる要因を挙げるができる。教育面では、水飲み鳥は高校理科「課題研究」の中で教師と生徒が共に研究を進められる妥当な教材である。

キーワード：水飲み鳥、熱機関、課題研究

1. はじめに

水飲み鳥の作動は熱機関として興味深く、熱学的地球のモデル教材としてとりあげられている。しかし、作動に関する定性的な説明はインターネットでたくさん見られるが、周期のような具体的なデータはほとんど見られない。そして、基本的なことだが、水飲み鳥が熱機関であるということも、必ずしも実証されているわけではない。ただし、水飲み鳥の周期的動作における理論上のpV図を提案しようという試みはなされている<sup>1)</sup>。また、その周期に関する実験的研究としては、J. Guemezらの研究があり、コップに接続して用いるタイプの水飲み鳥を用いて、周期と湿度の関係が見いだされている<sup>2)</sup>。

本稿では、水飲み鳥の作動の一般的説明を紹介した後、その熱機関としての特徴を述べる。そして、頭部および胴体の表面温度測定結果から、熱機関としての特徴の一つを検証する。次に、J. Guemezらの理論を再検討しつつ、彼らとは異なった状況で行った実験から、周期と湿度の関係を考察し、水飲み鳥の周期的動作の特徴を示す。さらに、周期に関する新たな実験式を提案する。

最後に、水飲み鳥の測定は高校物理の新科目「課題研究」の興味深い教材であることを示す。

2. 作動の一般的説明

以前は水飲み鳥の内部の液体にはエーテルが使われていたが、現在は塩化メチレンが用いられている。塩化メチレンは、沸点40℃の揮発性液体であり、水飲み鳥の内部で蒸発と凝縮を繰り返す。一般に、水飲み鳥の作動は次のように説明されている。

①頭部から水が蒸発する（前方に設置された容器中の水に頭部の嘴が浸かる）。頭部には布が貼られている。

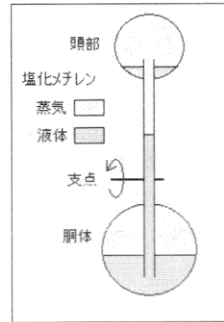


図1 装置の模式図

②水の蒸発により頭部の温度が下がる。

③頭部温度の低下により、頭部の蒸気が凝縮する。

④温度の低下と凝縮により頭部の気圧が下がる。

⑤頭部と胴体の気圧差により管内の液面上昇する。

⑥液体が頭部に流れ込んで重心が上がり、前方へ傾く。

⑦傾くことで管の下端が液面より上に出る。

⑧胴体の蒸気の気泡が管を上昇し、液体は下降する。

⑨液体が胴体に流れ、頭部と胴体の気圧が平衡する。

⑩液体が胴体へ戻ったことで重心が下がり、鳥は元の直立状態に戻る。

①～⑩で1周期が経過し、以上のプロセスを繰り返す。このように、力学的な側面を主にした説明は熱の流れが明確ではない。加えて、塩化メチレンの蒸発や凝縮も自明ではなく、水飲み鳥が熱機関であることを保証するものではない。図1に装置の模式図を示した。

3. 熱機関としての特徴

(1) 熱機関の概念

様々な熱機関にみられる共通性（＝概念の内包となるもの）は、次の2点に代表される。

a. 周期的動作（サイクル動作）を行う。

b. 熱の一部が外部への仕事に変わる。

そして、概念の外延として具体的なエンジン装置類の働きがある。水飲み鳥の動作を観察して、pV図、ST図を得ることができれば、熱機関の共通性に対応して、

a' 周期的動作の図的確認

b' 熱力学第1法則を用いた熱効率の計算

が可能になり、物理教育に資する。

(2) 水飲み鳥の熱源と冷却器

水飲み鳥の場合、水が蒸発している部分が冷却器（低熱源）に相当する。具体的には、頭部に貼られた布が水を吸って定期的に蒸発が行われている状態である。高熱源は胴体の周囲の空気であると考えられる。

植田は、水飲み鳥が熱機関であるとして概要次のように述べている<sup>3)</sup>。

「空気中の常温熱が鳥の胴体に入る。頭部の水はそのエントロピーを吸収し、水の蒸気として出ていく。その残りのエネルギーが仕事になるわけである。」

頭部は冷却器に接触しているの、頭部の塩化メチレン蒸気温度は室温より低くなっていると考えられる。頭部で発生する塩化メチレン液体の凝縮熱は、冷却器に引き渡されて水の蒸発熱となって空間に出ていく。胴体では、周囲の空間から常温熱が補給され、塩化メチレンの液体が蒸発する。このとき蒸気温度が下がるので、胴体の塩化メチレン蒸気の温度はやはり室温より低いと考えられる。逆に、胴体の蒸気温度が室温より低いために、熱伝導によって常温熱の流入が可能だとも言える。以上が、熱機関として熱の出入りが存在するための条件である。

次に、周期的な運動は、管内の液面が上昇して装置が傾いて塩化メチレンの液体が胴体へ戻り、頭部と胴体の気圧が平衡することで保証される。装置が傾いたとき、両方の蒸気の混合が行われるので、頭部及び胴体の蒸気温度は変化すると考えられる。以上を4で検証する。

4. 水飲み鳥の熱機関としての周期性

本実験で使用した水飲み鳥は、コップに接続して用いるタイプではなく水平面に置くタイプのものである（株式会社「富士商商品センター」Happy Bird）。実験は、静かな室内で、室温、湿度、気圧をほぼ一定にするため、外気とは接続した状態で行われた。

(1) 頭部温度の周期的変化

頭部表面温度と室温との差を、K熱電対（アルメル-クロメル熱電対）を用いて測定した。温度測定の様式図を図2に、熱電対の出力電圧Vの時間変化を図3に示す（V=40mVで約1K）。図3では、Vの増加は頭部表面温度の低下を意味する。まず、Vは100mV程度であることから、頭部表面は室温より2～3度低いことが分かる。次に、着水前後のVの5 mV程度の変動が周期的に認められ、換算すると $\Delta T \approx 0.1K$ の温度変動に相当する。着水が近づくと頭部表面温度が低下していき、着水直後に上

昇するのがわかる。着水時に頭部と胴体の蒸気の混合が生じていることを示すデータである。

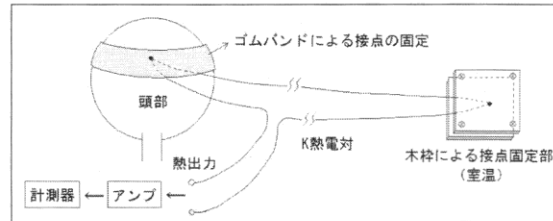


図2 温度測定の様式図

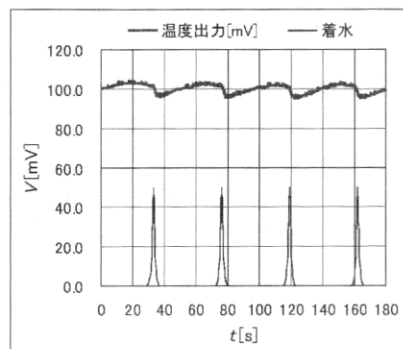


図3 頭部温度の時間変化

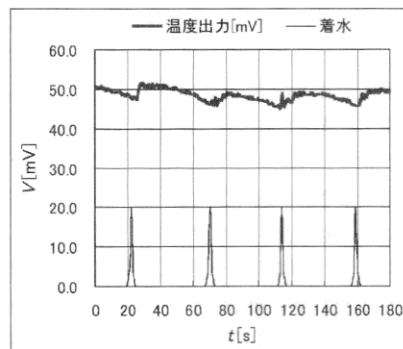


図4 胴体温度の時間変化

(2) 胴体温度の周期的変化

同様に胴体表面温度と室温との差をK熱電対を用いて測定した。出力電圧Vの時間変化を図4に示す。図4においても、Vの増加は胴体表面温度の低下を意味する。まず、Vは50mV程度であることから、頭部表面は室温より1～2度低いことが分かる。次に、頭部のときと同様に、着水前後のVの5 mV程度の変動（ $\Delta T \approx 0.1K$ の温度変動）が周期的に認められる。しかし、頭部とは逆に、着水が近づくと胴体表面温度が上昇していき、着水直後に低下するのがわかる。これも着水時に頭部と胴体の蒸気の混合が生じていることを示すデータである。

### (3) 考察

頭部や胴体の表面温度は、内部の塩化メチレン蒸気温度とは異なる。しかし、両者は全く無関係ではなく、表面温度は蒸気温度に追従していると考えべきである。こう仮定すれば、図3、図4から次の結論が導かれる。

- ①胴体の蒸気温度は室温より低い。
- ②頭部の蒸気温度は胴体の蒸気温度より低い。
- ③周期的な着水に同期して頭部蒸気温度と胴体表面温度が変化する。

結果①により、常温熱が胴体から入って吸熱が起こり、塩化メチレンの蒸発を可能にする。結果②より、頭部の蒸気圧は胴体の蒸気圧よりも低くなり、頭部における凝縮と水蒸発による放熱を伺わせる。そして、内部の液面上昇が可能になる。結果③により、着水時に頭部と胴体の蒸気の混合が生じて、次のサイクルが起こる。このように、熱の出入りが存在するための条件が満たされ、周期的動作がおこなわれていることから、水飲み鳥が熱機関として作動していることが理解される。

しかし、転倒時における蒸気の混合の程度や、吸熱と放熱、内部の液柱上昇及び装置の転倒という仕事に関する量的なことはわからない。また、図4では胴体表面温度の周期的なピーク値に変動が見られるが、これについても今後の追究課題である。

### 5. 水飲み鳥の周期的運動の先行研究

J. Guemezらの周期に関する理論は、およそ次のようなものである<sup>2)</sup>。

#### (1) 湿度と周期の関係

一周期の運動において、頭部からの水の蒸発により大気中に流失する水の質量を $\Delta m$ 、頭部からの水蒸発速度を $v$ とすると、周期 $\tau$ は $\Delta m$ と $v$ の比で求められる。

$$\tau = \Delta m / v \quad \dots\dots\dots (1)$$

拡散法則によると、大気の相対湿度が $H$ のとき、水蒸発速度は $100 - H$ に比例する。

$$v = k (100 - H) \quad \dots\dots\dots (2)$$

比例定数 $k$ は気温や気圧に依存し拡散係数とよばれる。両式より $v$ を消去すると、周期 $\tau$ は式(3)のように、 $100 - H$ に反比例することになる。

$$\tau = \Delta m / k \cdot (100 - H)^{-1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ところが、水飲み鳥の実際の動きを観察すると、周期データは $(100 - H)^{-1}$ ではなくその異なった累乗に依存することを見出した。そこで、彼らは式(4)のような実験式を提案している。比例定数 $K$ と指数 $\beta$ は状況によって定まる変数であるとしている。

$$\tau = K \cdot (100 - H)^{-\beta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

### (2) 周期を決める要因の分析

頭部の水の蒸発によって一周期に失われる熱は $C\Delta T$ と表され、式(5)のように $\Delta m$ と水の蒸発エンタルピー $\Delta h$  (単位質量あたりの蒸発熱)の積で与えられる。

$$C\Delta T = \Delta m \Delta h \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $C$ は頭部の熱容量、 $\Delta T$ は一周期に生じる頭部の温度低下量の大きさである。式(1)と式(5)により、周期 $\tau$ と $\Delta T$ との比例関係が導かれる。

$$\tau = C \Delta T / v \Delta h \quad \dots\dots\dots (6)$$

そして、Clausius-Clapeyron則を用いると、 $\Delta T$ の表式を導くことができる<sup>4)</sup>。

$$\Delta T = \rho g R T_R^2 \Delta z / (\Delta h_v P_l) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $g$ は重力加速度、 $R$ は気体定数、 $T_R$ は室温、 $\Delta h_v$ 、 $\rho$ 、 $P_l$ は、それぞれ塩化メチレンの蒸発エンタルピー、密度、室温における蒸気圧である。 $\Delta z$ は、管内を塩化メチレンが上昇するとき、頭部温度低下量が $\Delta T$ となるときの、胴体の液面を基準にした液柱の高さである。

Guemezらは、水飲み鳥の内部の液柱の観察結果から、 $\Delta z$ と $\Delta T$ の周期的変化を試算している。彼らは、水の入ったコップに接続して用いるタイプの水飲み鳥を小さな密閉容器の中に入れ、連続的に湿度を変えて測定し、周期 $\tau$ が式(4)に非常によく一致する結果を示した。湿度75%以上では、 $\beta = 1.24$ となり、75%以内では、 $\beta = 1.82$ に不連続的に変化する実験結果を得た。そして、 $\beta > 1$ となる原因は、装置内に生じる対流ではないかと推論している。

### 6. 水飲み鳥の周期的運動の測定

周期 $\tau$ のしたがう実験式が、なぜ式(3)ではなく式(4)になるのかを解明すべく、周期と湿度の関係を調べるための実験を行った。Guemez論文には見あたらない水蒸発速度と湿度の関係の実験的検討も併せて行った。水平面に置くタイプの水飲み鳥を2台用い、1台は周期測定に、もう一台は頭部で生じる水蒸発の速度測定に用いた。

#### (1) 蒸発速度の測定

- I. 首振り運動をしないように装置を固定する。
- II. 自然な状態にして装置の首振り運動をさせる。

上の2つの条件で次のように行った。

- ①装置の頭部が乾燥した状態で質量を電子天秤(最小秤量10mg)で測る。これを $m_0$ とする。
- ②頭部のフェルト部分を水で濡らして質量( $m$ とする)を測り、 $m$ の時間変化を記録する。
- ③頭部からの水蒸発量 $\Delta m = m - m_0$ を求める。

$\Delta m$ の時間的変化の一例を図5に示す。グラフは直線的変化を示すので、その傾きから1分あたりの蒸発量を求め

$v$ とした。縦軸の誤差棒は電子天秤の精度 ( $\pm 0.005\text{g}$ ) による。 $v (= dm/dt)$  対  $100-H$  の関係を図6に示す。図6では、データは多少ばらつくがI, IIともに原点を通る直線に乗るので、式(2)はほぼ成立していると考えてよい。I, IIの傾きは拡散係数  $k$  であるが、その違いから首振り運動をさせたときは水蒸発が促進されていることがわかる。このときのデータは、式(2)の  $k$  が室温  $T_a$  や気圧  $p$  に依存するため、 $T_a = 24 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $p = 993 \pm 3\text{hPa}$  のように、 $H$  以外の条件がほぼ一定になるものに限定した。測定中の湿度変化は、 $\Delta H = \pm 1\%$  以内である。図6の誤差棒は、電子天秤の精度 (縦軸) および湿度計の精度 ( $\pm 4\%$ , 横軸) による。

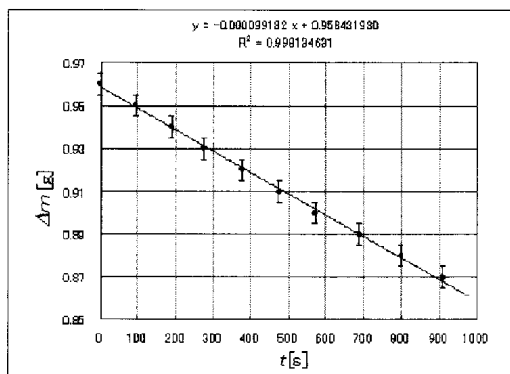


図5 水蒸発量の時間変化

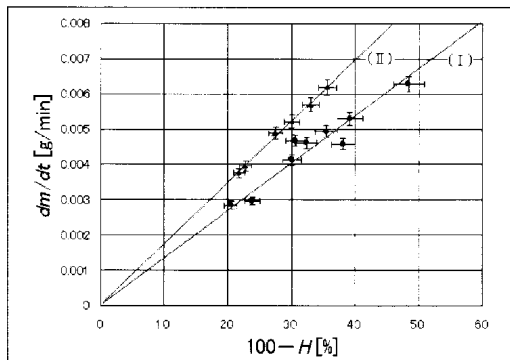


図6 蒸発速度と湿度

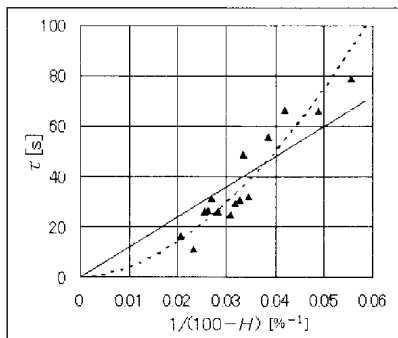


図7 周期と湿度

(2) 周期の測定

頭部の嘴が水面に接触したときの時刻  $t_k$  を、ストップウォッチを用いて連続的に測定していく。となりあう時刻の間隔をそのときの周期  $\tau_k$  とし、 $\tau_k$  の平均を取って装置の周期  $\tau$  とする。 $\tau$  と  $(100-H)^{-1}$  の関係を図7に示す。データを実線と比較すると、 $\tau$  は  $(100-H)^{-1}$  にほぼ比例しているとみることもできる。しかしながら、点線で示した  $(100-H)^{-1}$  の曲線の方がよい一致を示す ( $\beta = 1.8 > 1$ )。これは、Gomezらの結論と同じ傾向である。つまり、式(3)よりも式(4)がデータによく一致する。

7. 水飲み鳥の周期的運動モデルの提案

$\tau$  と  $(100-H)^{-1}$  の関係は図7のように比例関係からずれる。Gomezらは、その理由を装置内の対流に求めているが、対流を実験的に検出している訳ではない。我々の実験では、図5のように水蒸発速度  $v$  は  $100-H$  と比例関係にあり、式(2)はほぼ成立するようにみえる。もし対流の影響ならば、 $v$  は  $100-H$  と比例関係にならないのではないか。これをどう考えればいいのか。ここでは、第38回物理教育研究集会における発表内容<sup>5)</sup>を踏まえ周期に関する新たな実験式を提案したい。

(1) 周期の熱学モデル

式(6)は、周期が頭部の蒸気に生じる温度変化に比例することを意味する。 $\Delta T$  に対する比例定数を  $c$  として、

$$\tau = c \cdot \Delta T \dots\dots\dots (8)$$

となる。これを周期の熱学モデルとよぶ。図3では、頭部温度におけるほぼ一定の周期的変動が確認されるので、式(8)は実験的にも妥当なモデルであるといえる。

(2) 周期の機能モデル

式(7)では、室温  $T_R$  がほぼ一定ならば  $\Delta z$  以外の物性値はほぼ一定になる。加えて、気圧が一定ならば拡散係数も一定になる。 $\Delta z$  がある値のときに装置の重心が支点よりも高くなって転倒するわけであるから、 $\Delta z$  が決まれば  $\Delta T$  が決まり  $\tau$  が決まることになる。 $\Delta z$  は装置の力学的制約であり、室温や湿度などの外部変数にはよらず周期的に一定値を保持しなければならない。式(7)は、 $\Delta z$  の周期的一定性と、 $\Delta T$  の周期的一定性の線形関係を示している。図3の結果は、式(7)の妥当性を示すものである。

式(7)と式(8)より  $\Delta T$  を消去し、式(2)を用いて  $v$  を  $H$  で表すと、周期  $\tau$  と  $\Delta z$  の直接的関係を与える式(9)を得る。

$$\tau = \frac{C \rho g R T_R^2 \Delta z}{k (100-H) \Delta h \Delta h_i P_i} \dots\dots\dots (9)$$

式(9)は、周期の熱学モデルに装置の機能を組み込んだものである。 $\Delta z$  と  $100-H$  以外の定数をまとめて  $a$  とすると、式(9)は次のようになる。

$$\tau = a \cdot \Delta z \cdot X \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$X \equiv (100 - H)^{-1}$$

式(10)を周期の機能モデルとよぶ。 $\Delta z$ は装置の力学的制約であり外部変数に依存しないので、 $\tau$ は $X$ に対して線形になる。しかしながら、実際のデータは図7のように $X$ に対して線形ではないように見える。

(3) 周期に影響する機械的要因について

周期的動作が生じるには、装置の管を塩化メチレンの液体が上昇することが必要である。2, 3で示したように、転倒時に頭部と胴体の蒸気が混合して気圧が平衡すれば、正立したときに管内の液面の位置は胴体内の液面と同じになる（このとき液面の位置を0にとる）。管内の液柱は頭部と胴体の圧力差によって、管壁の摩擦力に逆らって上昇する。液柱が上昇する速度を $v_l$ とすると、 $v_l$ は両者がほぼ釣り合った状態で決定される。周期は液面が0から $\Delta z$ まで上昇するまでの所要時間となるため、式(11)の制約が生じる。

$$\Delta z = \int_0^{\tau} v_l dt \cdots \cdots \cdots (11)$$

$$\Delta z - \Delta z_0 = \int_0^{\tau} v_l dt \cdots \cdots \cdots (12)$$

しかし、実際には転倒直後の正立時に管内の液柱がす早く管の中央付近まで上昇して、その後ほぼ一定の速さで管を上昇するようになる。その理由として、蒸気の混合は転倒時に生じる短時間のものであり、正立時にすぐ気圧差が生じる、などが考えられる。この初期上昇位置を $\Delta z_0$ とすると、 $\Delta z_0 < \Delta z$ である。液柱は $\Delta z$ ではなく、実質的には差 $\Delta z - \Delta z_0$ を上昇することになり、式(12)が周期を決める。湿度が高いとき $v_l$ は小さくなり、周期が増加する。また、 $\Delta z_0$ の湿度による変動は不明である。

以上より、 $\tau$ と $(100 - H)^{-1}$ の関係が比例関係からずれる一因として、

- ・周期 $\tau$ に関する式(12)という制約の存在
- ・ $v_l$ と $\Delta z_0$ の湿度による変動

が考えられる。しかし、図7の傾向から、比例関係からのずれは小さく、したがって $v_l$ と $\Delta z_0$ の湿度による変動は小さいと考えられる。

(4) 周期に関する実験式の提案

ここでは、式(12)を考慮した実験式を提案する。観察によると液柱の上昇速度 $v_l$ はほぼ一定であり、式(12)の積分は速度と時間の積 $v_l \cdot \tau$ で置き換えることができる。

$$\Delta z = \Delta z_0 + v_l \cdot \tau \cdots \cdots \cdots (13)$$

$v_l$ は湿度 $H$ が増加すると小さくなるので、 $v_l$ は $H$ に対して減少関数（または、 $X$ に対して増加関数）と考えられる。 $\Delta z_0$ の $H$ 依存性は不明である。しかし、 $v_l$ と $\Delta z_0$ の $H$ 依存

度は小さいと考えられるため、多少荒い考えではあるが、ここでは $\Delta z_0$ と $v_l$ が $H$ に無関係に一定であると仮定する。式(13)を式(10)に代入して次式を得る。

$$\tau = a \cdot (\Delta z_0 + v_l \cdot \tau) \cdot X$$

これを $\tau$ について解くと式(14)が得られる。式(14)は、 $v_l$ と $\Delta z_0$ の影響を平均的に組み込んだモデルであると解釈される。式(14)を周期の実験モデルとよぶ。

$$\tau = \frac{a \cdot \Delta z_0 \cdot X}{1 - a \cdot v_l \cdot X} \cdots \cdots \cdots (14)$$

実験モデルは機能モデルと違って、周期 $\tau$ は $X$ に対して非線形になる。図7のデータを、次の3つの最適曲線とともに再度図8に示す。

対流モデル 曲線ア)  $\tau = K \cdot (100 - H)^{-\beta} \cdots \cdots (4)$

機能モデル 直線イ)  $\tau = B \cdot X \cdots \cdots (10)$

実験モデル 曲線ウ)  $\tau = B' \cdot X / (1 - A \cdot X) \cdots \cdots (14)$

最適曲線は、Gomezらの式(4)では $K$ と $\beta$ を未知量として、機能モデルの式(10)では $B$ を未知量として、実験モデルの式(14)では $B'$ と $A$ を未知量として最小二乗法で求めた。ここで、 $v_l$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta z_0$ には次のような関係がある。

$$A = a \cdot v_l \quad B = a \cdot \Delta z \quad B' = a \cdot \Delta z_0$$

図8に示された結果は、次のように表される。

- ・曲線ウ)は、直線イ)よりもデータによく合う。
- ・曲線ウ)は、曲線ア)の形によく似ている。

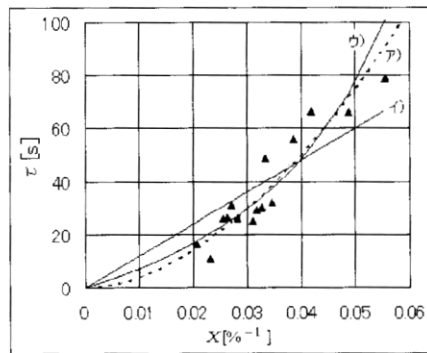


図8 周期と湿度(2)

我々の実験条件では、水蒸発速度 $v$ は $100 - H$ と比例関係になるので、周期データが式(4)に乗ることを対流で説明することができない。それに1つの解釈を与えるのが式(14)の実験モデルである。対流のない静かな室内でも、実験モデルを用いると、周期が見かけ上、 $(100 - H)^{-\beta}$ に比例するようになることに説明がつく。

(5) 測定している周期と熱学的に決まる周期

機能モデルあるいは実験モデルの周期は、液柱の高さが $\Delta z$ となって頭部温度が $\Delta T$ 低下するまでの時間である。これは熱学的に決まる周期であり $\tau_{th}$ と記す。このとき、装置の重心が支点より高くなる。実際は、装置の支

点には摩擦があり、液柱の高さが $\Delta z$ になって装置がすぐに転倒するわけではなく、装置は徐々に傾いていく。したがって、着水から次の着水までの時間を $\tau_{ex}$ とすると、測定している周期は $\tau_{ex}$ であり、 $\tau_{ex}$ は $\tau_{th}$ とは異なる。 $\Delta z$ になってから着水するまでの時間と、着水から正立までの時間の合計 $\delta t$ は、

$$\tau_{ex} = \tau_{th} + \delta t \dots\dots\dots (15)$$

となる。 $\delta t$ は周期 $\tau_{ex}$  (または $\tau_{th}$ ) に比べて小さい値ではあるが、周期と湿度の関係を考えるにあたって、機能モデルで $X$ に比例するのは $\tau_{th}$ であって $\tau_{ex}$ ではない。このことが、図7の傾向に反映されている可能性がある。

### 8. 高校物理の課題研究のために

#### (1) 文科系大学生の反応

筆者の担当する演習で、水飲み鳥を観察させた。

- ・小学校何年生の単元になるか?
- ・水の入ったコップをはずすとどうなるか?

など疑問が出された。そして次の課題を出した。

- ①この装置はどういうメカニズムで動き続けるのか。
- ②「水を飲ませる」以外にどのようにすれば動き続けるのか。

①については、学生は2で示したような説明をネットから引いていたが、②ではアルコールランプで加熱するという解答であった。これは非常に危険な方法である。授業では、100W電球で胴体を温めた。電子天秤で頭部からの水蒸発量を測定し、1分間に失われる熱量を求めた。吸熱量を見積もるのは難しいが、学生に熱機関の概念を形成させる一つの教材になると実感された。

#### (2) 水飲み鳥の面白さ

学校で行う課題研究に求められるのは、次のような事柄である。

- ①学習への関心・興味の面からは、生徒に身近なテーマであること。
- ②思考力・判断力育成という視点からは、様々な原因を含む現象であること。
- ③実験技能・表現力育成という視点からは、多面的な継続的測定が可能な教材であること。
- ④知識・理解という視点からは、学校理科 (化学・物理) と接続した内容であること。

水飲み鳥の測定は、ストップウォッチ、温・湿度計、電子天秤などで多面的な測定が継続的にできる。また、状態変化や力のモーメントなど物理・化学的学習内容と密接につながっている。加えて、様々な原因を含み未知なこともたくさんある。水の蒸発だけが周期的動作の原因なのではない。以上、水飲み鳥の研究は高校生理科課

題研究例として十分に推奨できるものである。

### 9 おわりに

水飲み鳥の頭部と胴体の表面温度測定により、周期的に常温熱が胴体から入って吸熱が起り、頭部で放熱されていることがわかった。そして、我々の周期測定でも、Guemezらと同様に周期のしたがう実験式は式(3)ではなく式(4)であった。その理由として、Guemezらは水飲み鳥を入れた装置内に生じる対流に原因を求めている。しかし、我々の実験場面では水蒸発速度が $100-H$ と比例関係にあり、対流の直接的影響は認められなかった。周期の傾向については対流ではなく、

- (a) 液柱の上昇に関係する要因、式(14)。
- (b) 実測している周期が熱学上の周期とは異なること。指摘することができる。こうした原因により、式(4)が見かけ上成り立つのではないかと考えている。要因(a)を考慮して導いた実験式は $(100-H)^{-1}$ に関して非線形となり、式(4)と形の類似した曲線が得られた。そして、その実験式は周期データにもよくあう。

水飲み鳥の実験は、高校理科の課題研究の教材として、教師と生徒がともに研究を進めるに耐え得るおもしろいテーマである。

最後に、周期的動作に関連して、水飲み鳥の作動のpV図、ST図をイメージし、観察事実を裏付けるような数値モデルを作ることは今後の課題である。

### 参考文献

- 1) P. E. Richmond: "The Thermodynamics of a Drinking Duck", Entropy in the school Proceedings of the 6<sup>th</sup> Danube Seminar on Physics Education sponsored by UNESCO, Balaton May 1983, pp215-227
- 2) J. Guemez, C. Fiolhais: "Experiments with the drinking bird", Am. J. Phys. 71, pp1257-1263
- 3) 植田敦: 石油と原子力に未来はあるか—資源物理学の考え方(増補)—, 亜紀書房 1989, pp180-183
- 4) 前掲2)の式(2)~(4)を一つにすると、 $\Delta T$ の表式(7)が導かれる
- 5) 桐山信一, 黒川富秋: 第38回物理教育研究会発表予稿集 2008, pp8-11

\* 創価大学 教職研究科 (教職大学院)  
 "Study of Periodic Motion of Heat Engine 'Drinking Bird'  
 —For Teaching Physics in Students' Research of High-school Science—"  
 by KIRIYAMA, Nobukazu

(2009年1月10日受理)