

常温熱機関（水飲み鳥）の熱的特徴

—学校理科の教材にするために—

桐 山 信 一

要 約

水飲み鳥の熱的な作動の解明に向け、頭部と胴体の周期的温度変化の傾向を詳しく調べるために、C. A 熱電対専用アンプ AD595を用い、常温（室温）、常温と頭部表面温度の温度差、常温と胴体表面温度の温度差の3つの物理量及び転倒時刻の記録を、パソコン計測による同時測定として行った。

測定開始時は、胴体温度、頭部温度は常温と同じであるが（熱平衡）、メタノール滴下後は胴体、頭部とも常温より低くなって徐々に冷却していく。頭部の温度は胴体より低くなり、頭部の蒸気温度が転倒の周期に同期して変動する。ここでは、次のような特徴がある。

- ①頭部温度は胴体温度より約2～3K低い。
- ②頭部の蒸気温度が転倒時に上昇し、転倒後はすぐに低下する。これを繰り返す。
- ③胴体の方は、周期的変化をせずに単調に冷えていく。

転倒後、液柱の先端が胴体の液面と離れ、高温の胴体の蒸気が頭部に流れ込む。そのため、頭部の蒸気に温度上昇が起こると考えられる。このとき、頭部で凝縮、胴体で蒸発が生じて液柱の上昇が繰り返されるなかで定常的な周期的動作が行われていると考えるのが現時点の1つの仮説である。その後、頭部の蒸気温度だけではなく、胴体の蒸気温度も転倒の周期に同期して変動する作動モードが現れた。低温の頭部の蒸気が胴体に入って温度低下が起こり、その後の上昇は胴体が常温熱を吸収するためと見られる。この作動モードでは、蒸気の混合は十分に行われていると考えられる。

1 はじめに

水飲み鳥のような常温熱機関は、身近な科学おもちゃとして人の興味を引く。それが今、環境のモデルを考察する上で1つの議論となっている。

エントロピー学会誌「えんとろぴー」第62号に掲載された第25回シンポジウムのセッションⅢでの講演記録において、安田は水飲み鳥を触媒反応のような「活動系」であるとし、全エントロピーの2階の時間微分 d^2S/dt^2 が正になるとしている¹⁾。それ

に対して白鳥のコメントがあった。全エントロピーは1周期あたり一定の増加量となるから周期を単位にとった時間に比例する故、 $d^2S/dt^2 > 0$ の曲線で表されるような運動は定常ではないと反論している²⁾。さらに、川鳥は水飲み鳥の作動にそってエントロピー生成を論じ、生成の「加速度」 d^2S/dt^2 が正になるような「力」が働いているのではないと結論づけている³⁾。

以上の経緯に鑑み、黒川らは水飲み鳥をめぐるエントロピー議論への1つの資料を提供した⁴⁾。そこでは、まず水飲み鳥が熱機関であることが実験的に示された。頭部と胴体に温度差があり、頭部の温度が0.1K程度周期的に変動していることが確認され、水飲み鳥が熱機関であることをほぼ説明することができた。水飲み鳥と水の蒸発・凝縮の周期的過程で仕事を生み出すランキンサイクルとの類似性や違いが明らかにされ、水飲み鳥の周期的動作への示唆が得られた。また、頭部の水蒸発に伴う放熱量は、周期が60秒のとき1サイクルでは13J程度で、エントロピーに換算すると0.05 [J/K]程度、管内の液柱上昇による仕事は 1.5×10^{-3} J、仕事率に直すと 3.3×10^{-5} Wと試算された。次に、水飲み鳥の運動により生成されるエントロピー S の時間変化を安田の提案する熱伝導モデルに基づいて頭部の周期的温度変化を踏まえて計算した。その結果は S の時間変化は上に凸の曲線の周期的な繰り返しとなり、 d^2S/dt^2 は正にはならなかった。水飲み鳥を理解するための教材という面から、水飲み鳥の等価モデルが提案され、熱的測定やモデル作りへの示唆が得られた。しかし、次のような問題も残った。

- ①頭部と胴体の表面温度測定は同時測定ではなく、転倒の時刻もビデオによる判定であった。
- ②C. A 熱電対の出力はOP アンプによる増幅であり、その専用アンプを用いたものではなかった。
- ③C. A 熱電対の出力には規則的ではないデータも見られた。

一方、水飲み鳥の作動は熱理論の素材としても興味深く、熱学的地球のモデル教材としてとりあげられている⁵⁾⁶⁾。水飲み鳥の作動をランキンサイクルと比較し、周期的動作における理論上の pV 図、 TS 図を提案しようという試みもなされている⁷⁾。頭部の冷却に水の蒸発を用いた場合、振動周期と湿度の関係については先行研究がある。J. Guemez らによると、水飲み鳥の周期は $(100-H)^{-1}$ に比例するが、彼らは周期データによく乗る $(100-H)^{-\beta}$ のような実験式を提案している。ここで、 H は相対湿度であり、 $\beta > 1$ である。その理由として、彼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⁸⁾。彼らとは異なった状況で行われた桐山らの実験でも、周期と湿度の関係は彼らと同様の傾向を示したが、実験場面では対流の直接的影響は認められなかった⁹⁾。周期データの傾向については、内部の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が指摘された。桐山は、液柱の上昇を考慮して $(100-H)^{-1}$ に関して非線形となる実験式を導いた。それは、 $(100$

-H)^{-β}と形の類似した曲線になり、対流が生じなくても周期データが見かけ上(100-H)^{-β}のような実験式によく乗る傾向に一つの説明が付けられた¹⁰⁾。このことにより、周期の考察に一つの終着をみた。

その後、熱的作動の本格的な解明に向け、上述の①②③をクリアするかたちで、C. A 熱電対を用いて水飲み鳥が作動しているときの頭部および胴体の表面温度が測定され、その周期的変化が調べられた¹¹⁾。

こうした経緯のなか、本稿では、常温熱機関にはじめて出会うであろう読者も想定し、常温熱機関の作動について通常行われている説明を示し、そのなかでどのようなことが常温熱機関の説明として問題なのかを示す。このような基本的な事項をあえて記述するのは、本研究の動機に関連する説明にもなり、本研究で扱う常温熱機関も場合によっては実用化の可能性がないとはいえない以上、現代のエネルギー問題に何らかの関係があると考えているからである。

次に、水飲み鳥の転倒-直立の繰り返し(=周期的動作)がどのような機構で行われているのかを理解するために、周期を決める大きな要因として、湿度の影響を文献⁹⁾¹⁰⁾より概観する。そして、熱的作動の本格的な解明に向けて行われた最近の測定例を紹介し、知見を整理することとする。具体的には、頭部と胴体の周期的温度変化の傾向を詳しく調べるために、C. A 熱電対専用アンプを用い、常温(室温)、常温と頭部表面の温度差、常温と胴体表面の温度差の3つの物理量及び転倒時刻の記録を、パソコン計測による同時測定として行った経緯と結果および現時点での結論を述べる。その際、通常の投稿論文では割愛せざるを得ない内容、すなわちC. A 熱電対温度計の設計製作の過程や回路図、温度データの解釈なども含めて述べる。最後に、高校理科教材化に向けた検討を行いたい。

なお、文献4)では今後の研究課題として、水飲み鳥のpV図、ST図をイメージし、観察事実を裏付けるような熱的モデル(数値モデル)を作ることが示されたが、これについては、データ蓄積による慎重な検討を踏まえた上で構築することにし、本稿では扱わないこととする。

2 常温熱機関の作動の一般的説明における問題点について

水飲み鳥の内部の液体には、沸点40℃の揮発性液体である塩化メチレンが用いられている。実験に用いた装置を図1に示す。図1のようなものは、現在は絶版となっているらしく入手できないことが多い。展示されている現物を捜すしかないと言われている。

一般に水飲み鳥の作動は次のように説明されている¹²⁾。

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

常温熱機関（水飲み鳥）の熱的特徴

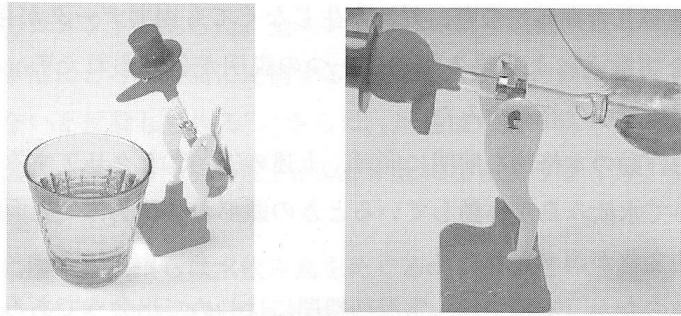


図1 装置の模式（左：直立 右：転倒）

- ②水蒸発により、頭部の温度が下がる。
- ③頭部温度の低下により、頭部の塩化メチレン蒸気が凝縮する。
- ④温度の低下と蒸気の凝縮により、頭部の蒸気圧が下がる。
- ⑤頭部と胴体に気圧差が生じ、気圧差により管内の液面が上昇する。
- ⑥塩化メチレンの液体が頭部に流れ込んで重心が上がり、装置が前方へ転倒する。
- ⑦装置が傾くことにより、内部の管の下端が胴体の液面より上に出る。
- ⑧胴体の蒸気の気泡が管を上昇し、頭部にたまっていた液体が下降する。
- ⑨液体が胴体に流れ込み、頭部と胴体の蒸気圧が平衡する。
- ⑩液体が胴体へ戻ったことで重心が下がり、装置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とにより周期的動作が継続されることになる。また、頭部と胴体の気圧差ができることについては、

⑤-2 頭部で塩化メチレンが凝縮するので、液面が上がって圧縮されても蒸気圧が高くならず、胴体では外部から熱を吸収し塩化メチレンが気化するので膨張しても蒸気圧が下がらない¹³⁾。

とする説明がある。

以上のような説明が一般的であるが、内容的には2つの問題がある。一つは、熱機関としての熱の流れが明確でないことである。胴体と頭部に生じた気圧差によって作動するとする説明（⑤⑥）は、力学的な側面を主にした説明となっている。それならば、水飲み鳥は熱機関ではなく、水車のような力学的機関である。また、⑤-2は定常的な気圧差の存在を説明するものであるが、胴体で熱を吸収できる理由が説明されていない。つまり、熱機関であるための熱の流れが不明である。二つ目は、塩化メチレンの凝縮・蒸発は自明な事実ではないことである。頭部における塩化メチレンの凝縮は、実験的に検証されていない。実際に装置のなかに圧力センサー・温度センサーを入れることは不可能であるが、何らかの実験的事実による説明が必要である。以上のことから、水飲み鳥の作動については、確認できないことをもとに説明が先行していると見える。したがって、まずは作動中の頭部と胴体の蒸気温度を測定することが必要である。温度センサーが装置内に挿入できないとすれば、頭部と胴体のガラス容器の表面温度は蒸気温度そのものではないが、内部の蒸気温度の傾向を知る手が

かりとなることは事実であるから、表面温度測定を行わなければならないといえる。このような基礎的な測定はこれまでまったくなされてこなかった。

3 周期的動作を決める要因—湿度—

(1) 周期に関する先行研究

J. Guemez らの周期に関する理論はおおよそ次のようなものである¹⁹⁾。1周期の運動において、頭部からの水蒸発によって大気中に流失する水の質量を Δm とする。頭部からの水蒸発速度を v とすると、周期 τ は、 Δm と v の比で求められる。

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

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。

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

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 τ は式 (3) のように、 $(100 - H)$ に反比例することになる。

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

ところが、実際の動きを観察すると、 τ は $(100 - H)^{-1}$ ではなくその異なった累乗に依存するとして、

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

のような実験式を提案している。比例定数 K と指数 β は状況によって定まる変数である。

頭部で一周期に失われる熱は、頭部の水蒸発によって生じる。その大きさ $C\Delta T$ は式 (5) のように、 Δm と水の蒸発エンタルピー Δh_e (単位質量あたりの蒸発熱) の積で与えられる。

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

ここで、 C は頭部の熱容量、 ΔT は頭部の一周期に生じる温度低下量である。式 (1) と式 (5) により、周期 τ と ΔT との比例関係が導かれる。

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

そして、Clausius-Clapeyron 則を用いると、 ΔT の表式を導くことができる。

$$\Delta T = \rho g R T_r^2 \Delta z / (\Delta h_i \cdot P_i) \quad \dots \dots (7)$$

ここで、 g は重力加速度、 R は気体定数、 T_r は室温、 ρ 、 Δh_i 、 P_i はそれぞれ塩化メチレンの密度、蒸発エンタルピー、室温における蒸気圧である。 Δz 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 ΔT となるような液柱の高さである。

Guemez らは、水飲み鳥の液柱の観察結果から、 Δz と ΔT 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 (図1とは異なるタイプ) 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 t 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て、 $\beta>1$ の原因を装置内の対流に求めている。

(2) 周期に関する新たな実験式の提案

その後、桐山は、以下のような考察のもと、新たな実験式を導いた¹⁵⁾。 τ と $(100-H)^{-1}$ の関係は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、桐山の周期測定では水蒸発速度 $v (=dm/dt)$ 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。この矛盾をどう説明すればいいのだろうか。

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。 ΔT に対する比例定数を c として、

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

となる。これを周期の熱学モデルとよぶ。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。式(7)では、室温 T_r がほぼ一定ならば Δz 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。 Δz 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、 Δz が決まれば ΔT が決まり τ が決まることになる。 Δz 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、 Δz の周期的一定性と、 ΔT の周期的一定性の線形関係を示している。

式(7)と式(8)より ΔT を消去し、式(2)を用いて v を H で表すと、周期 τ と Δz の直接的関係を与える式(9)が得られる。

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

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。 Δz 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。

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

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

式(10)を周期の機能モデルとよぶ。 Δz は装置の力学的制約であり外部変数に依存しないので、 τ は X に対して線形になる。

ここで、 τ と $(100-H)^{-1}$ の関係を図2に示す。縦軸は τ [s]、横軸 X [%⁻¹]は $(100-H)$ の逆数である。▲印は実験値、直線(ア)は式(3)、曲線(イ)は式(4)の最適線を示す。実際のデータは、図2のように X に対して線形ではないように見える。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。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周囲と同じになる（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_1 とすると、 v_1 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 Δz 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。

$$\Delta Z = \int_0^{\tau} v_1 dt \quad \dots \dots (11)$$

$$\Delta Z - \Delta Z_0 = \int_0^{\tau} v_1 dt \quad \dots \dots (12)$$

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 Δz_0 とすると、 $\Delta z_0 < \Delta z$ である。液柱は Δz 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。式（12）から伺われるように周期は短くなる。 Δz_0 の湿度による変動は不明である。また、湿度が高いとき、 v_1 は小さくなり周期が増加する。

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

- ・周期 τ に関する式（12）という制約の存在
- ・ v_1 と Δz_0 の湿度による変動

が考えられる。しかし、図2の傾向から、比例関係からのずれは小さく、したがって v_1 と Δz_0 の湿度による変動は小さいと考えられる。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_1 はほぼ一定であり、式（12）の積分は速度と時間の積 $v_1 \cdot \tau$ で置き換えることができる。

$$\Delta z = \Delta z_0 + v_1 \cdot \tau \quad \dots \dots (13)$$

v_1 は湿度 H が増加すると小さくなるので、 v_1 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。 Δz_0 の H 依存性は不明である。しかし、 v_1 と Δz_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 Δz_0 と v_1 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。

$$\tau = a \cdot (\Delta z_0 + v_1 \cdot \tau) \cdot X$$

これを τ について解くと式（14）が得られる。

$$\tau = \frac{a \cdot \Delta z_0 \cdot X}{1 - a \cdot v_1 \cdot X} \quad \dots \dots (14)$$

式（14）は、 v_1 と Δz_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。実験モデルは機能モデルと違って、 X に対して非

線形になる。図2では、実験データに加えて3つのモデルによる最適線が示されている。

対流モデル 曲線ア) $\tau = A \cdot X^\beta$ (4)

機能モデル 直線イ) $\tau = B \cdot X$ (10)

実験モデル 曲線ウ) $\tau = C \cdot X / (1 - D \cdot X)$ (14)

最適線は、Gomez らの式 (4) では A と β 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 C と D を未知量として最小二乗法で求めた。ここで、 v_i , Δz , Δz_0 には次のような関係がある。

$$B = a \cdot \Delta z \quad C = a \cdot \Delta z_0 \quad D = a \cdot v_i$$

図2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。

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、 $(100 - H)^{-\beta}$ に比例するよう見えることに説明がつく。

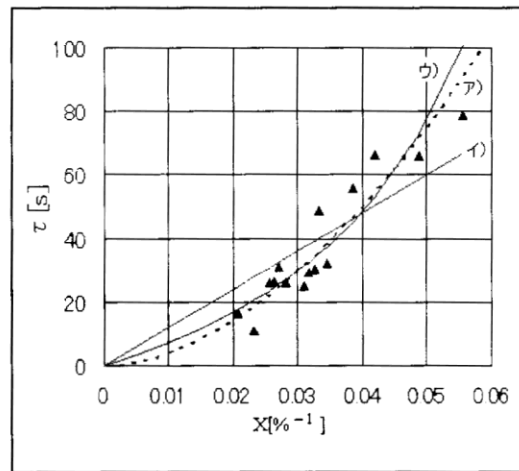


図2 周期と湿度

4 熱的特性の解明に向けて

(1) 熱電対による温度計測

C. A 熱電対専用アンプ AD595は、フル機能の計装アンプと熱電対用冷接点補償器を1つのモノリシック・チップ上に搭載したものである (図3)。計装アンプは校正されており、氷点リファレンスの組み合わせにより、10mV/°Cの出力を熱電対の信号から直接生成する¹⁶⁾。

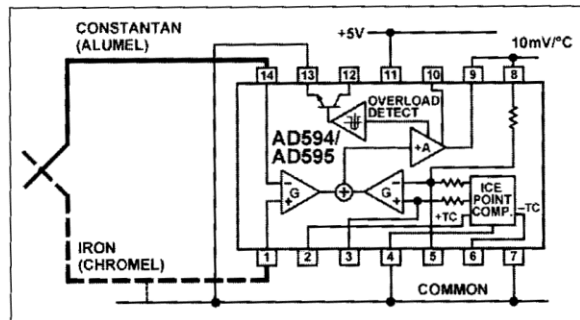


図3 C.A熱電対専用アンプAD595

(2) 温度計測系

図4に温度計測系の概念図を示す。接点1のAD595出力は、オペアンプ $\mu A741$ で増幅されてデジタルマルチメータで受ける(ch1)。接点2の出力と接点1の出力の差、接点3の出力と接点1の出力の差は $\mu A741$ で増幅され、2点間の温度差出力となる(ch2, ch3)。転倒時刻の記録は、水飲み鳥が転倒したときに嘴につけた小さな板が発光ダイオードの光を遮るように光センサーを設置して行う(ch4)。ch2, ch3, ch4はパソコン計測で行った。C.A熱電対はポリアミド被覆熱電対(0.1mm ϕ)を用いた¹⁷⁾。

温度測定系における回路図を、図5に示す。2種類の金属線を接続し、一方の接続点を熱すると金属線に電気が流れる。この現象をゼーベック効果とよぶ。これを温度センサーとして利用しているのが熱電対である。

図3のように、C.A熱電対のクロメル(白い方)をAD595の1番端子に、アルメル(磁性のある方)を14番端子に接続し、1番端子は4, 7, 13番端子とともに接地する。8, 9番端子は温度出力となる(10mV/°C)。図5では、温度出力は電力的に微弱なためオペアンプ $\mu A741$ を用いたボルテージフォロアーの非反転入力端子(高入力インピーダンス)に接続している。非反転入力端子は高入力インピーダンスであり、こうすることで3つの温度出力同士の相互干渉を避けることができる。接点1の温度出力と同値のボルテージフォロアーの出力(ch1)は、 $\mu A741$ を用いた非反転増幅器で3倍の増幅をかけ、デジタルマルチメータでの測定に適した電圧値にする(20°Cで600mV)。接点2, 3の温度出力と同値のボルテージフォロアーの出力(ch2, 3)については、接点1と接点2, 3の温度出力の差を同様の非反転増幅器で10倍の増幅をかけ、パソコン計測に適した電圧にする(温度差1Kで100mV)。出力段の50k Ω と0.1 μF は、ノイズ除去のためのローパスフィルターである。

(3) 実験方法

1) 常温, 頭部, 胴体の温度計測

装置の概念図と各測定点を図6に示す。図6で、Nは常温測定点であり接点は2枚

常温熱機関（水飲み鳥）の熱的特徴

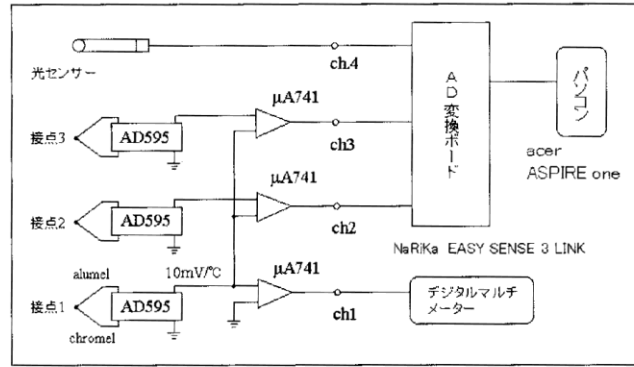


図4 温度計測系概念図

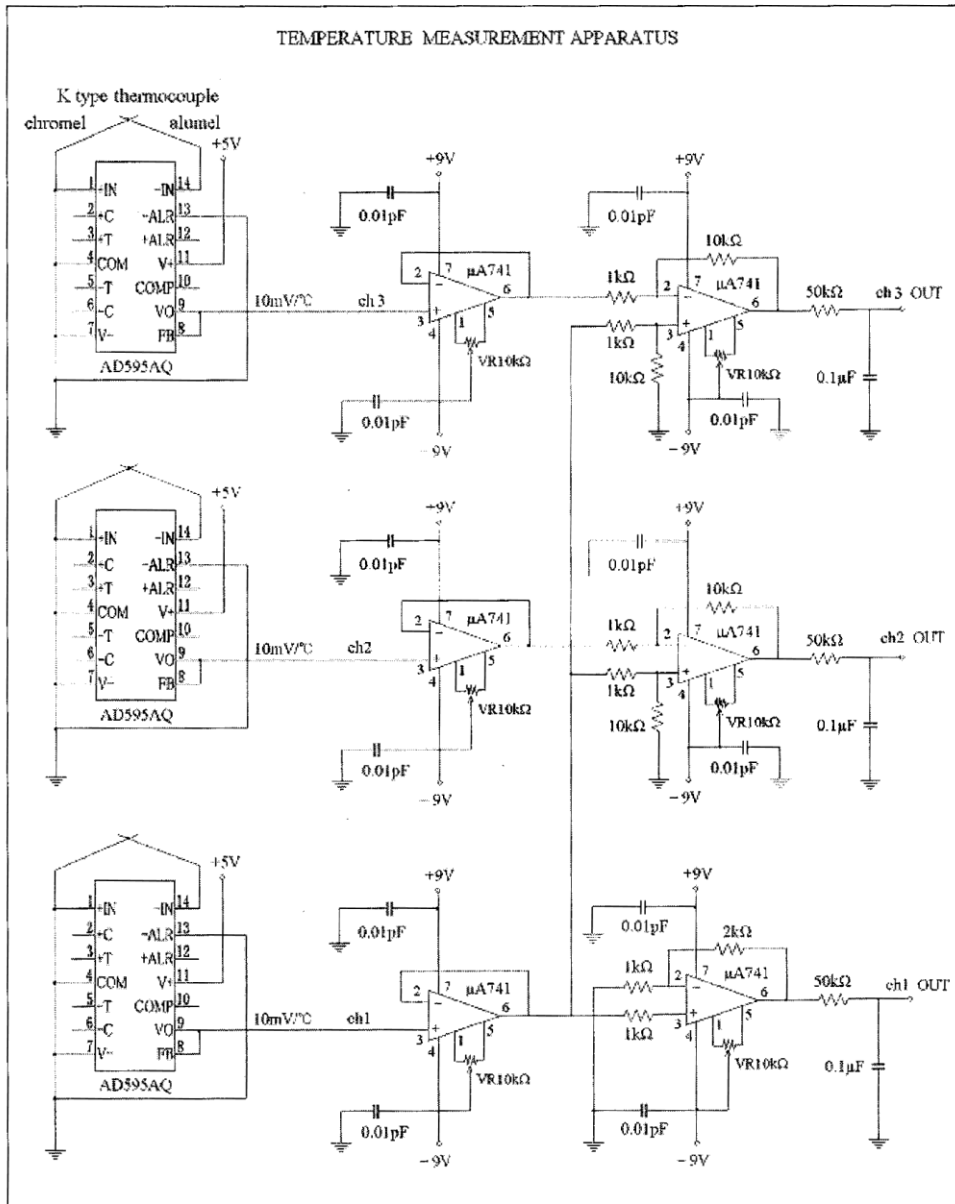


図5 温度測定系回路図

の木板にはさまれている（木板の間には接点をはさむスポンジがある）。Hは頭部温度測定点、Bは胴体温度測定点、Eは冷却器温度測定点である。Nの温度は温度計測系（図4）の接点1で測定する。NとBの温度差、NとHの温度差は接点2、3で測定する。

2) 作動方法

温度の時間変化を知りたいので、装置の作動は水ではなく頭頂にメタノール0.2mlを滴下して行った（図7）。水の蒸発は湿度に依存するが、メタノールは湿度に無関係に蒸発する。メタノールの蒸発により頭部の温度が低下すると、内部の液柱が上昇して重心が上がり装置が転倒する。

3) 制御変数の設定

市販の水飲み鳥の頭部には帽子が取り付けられてあり、胴体には羽がついている。これらを取り外して頭部と胴体を単純な状態に保った。また、水飲み鳥が転倒するときの傾きは、支点の形状により安定に動くような位置に決められている。さらに、転倒後に復元して直立するときには慣性により固有振動をする。このことが現象を複雑にし、頭部や胴体における温度変化に影響して法則性を見えにくくする一因であると判断した。そこで、図8のように、制御糸を取り付けて固有振動を止めるとともに、直立時の傾き（戻り角 β ）を制御する。さらに、支点の位置を調整できる仕組みを加え、ジャッキを設置して転倒時の傾き（転倒角 θ ）を制御できるようにした。装置の特徴的なサイズを図9に示す。

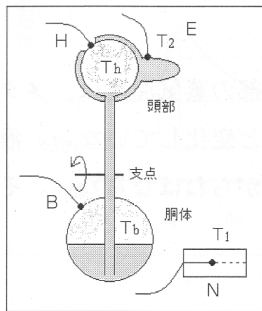


図6 装置と測定点

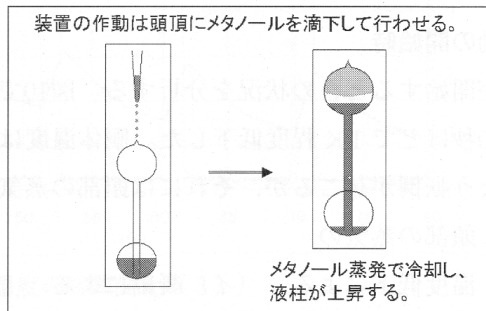


図7 頭部へのメタノール滴下

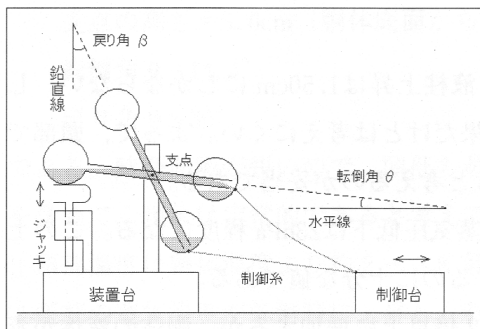


図8 制御する変数

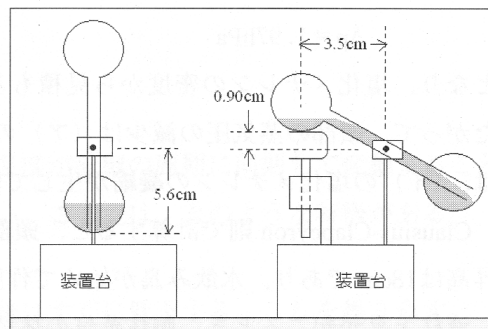


図9 装置のサイズ

(4) 実験結果と考察

以下、2009年度の学会発表から示す¹⁸⁾。図10に一例を示す。横軸は経過時間、縦軸は温度（第1軸）、光センサーの出力電圧（第2軸）である。はじめは胴体温度、頭部温度は常温（図10では環境温度）と同じであったが（27.3℃）、メタノール滴下後は胴体、頭部とも常温より低くなって、徐々に冷却していく（グラフが右下へ傾いていく）。頭部の温度は胴体より2～3 K低いことがわかる。また、頭部の蒸気温度が転倒の周期に同期して変動する。

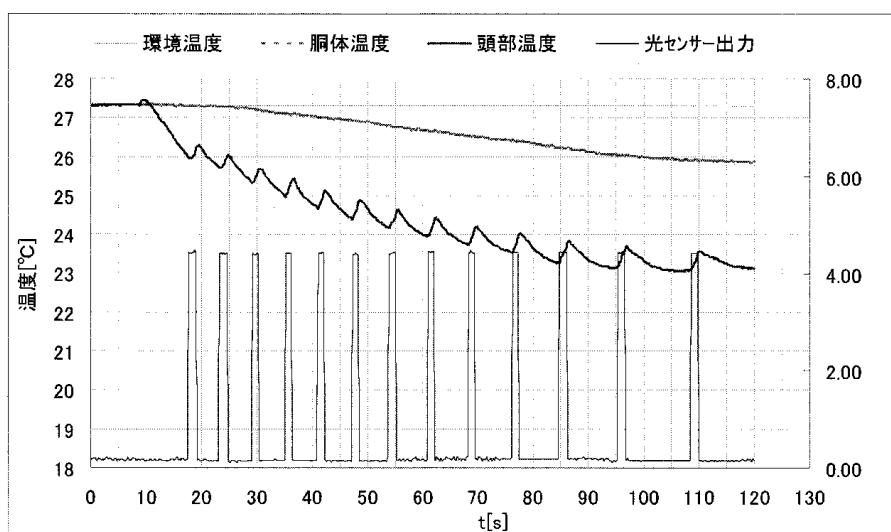


図10 温度の時間変化

1) 作動の開始時

作動が開始するときの状況を分析する。図10では、頭部の蒸気温度は、メタノール滴下後10秒ほどで1 K程度低下した。胴体温度はほとんど変化していない。液柱上昇にともなう転倒が起こるが、それには頭部の蒸気圧が下がらねばならない。その原因として、頭部の蒸気の

- (ア) 温度低下による
- (イ) 凝縮による

が考えられる。温度低下にともなう圧力変化量 Δp は微少である。頭部蒸気が26℃のとき、

$$\Delta p = 1.97 \text{ hPa}$$

となり、塩化メチレンの密度から見積もると液柱上昇は1.50cmにしかない。したがって、頭部の蒸気圧の減少は（ア）の結果だけとは考えにくい。よって、頭部では、（イ）の塩化メチレンの凝縮が生じていると考えるのが妥当である。

Clausius-Clapeyron 則で計算すると、頭部の蒸気圧低下は23hPa程度になる。この上昇高は18cmであり、水飲み鳥が始めて作動するのに十分な値である。

液柱上昇が起こるとき、胴体蒸気の体積も2倍以上に増加するが、胴体の液体が蒸発していると考えられるほかにないように見える。3周期目くらいから、胴体温度が低下

していくが蒸発熱によるものと考えれば説明が付く。しかしながら、現段階ではこれは一つの仮説であると考えるのが妥当であるといえよう。

2) 定常時

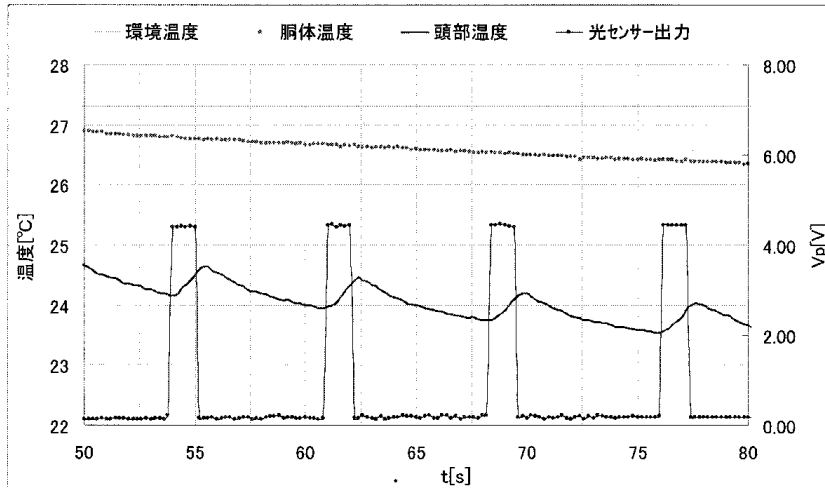


図11 温度の時間変化 (2)

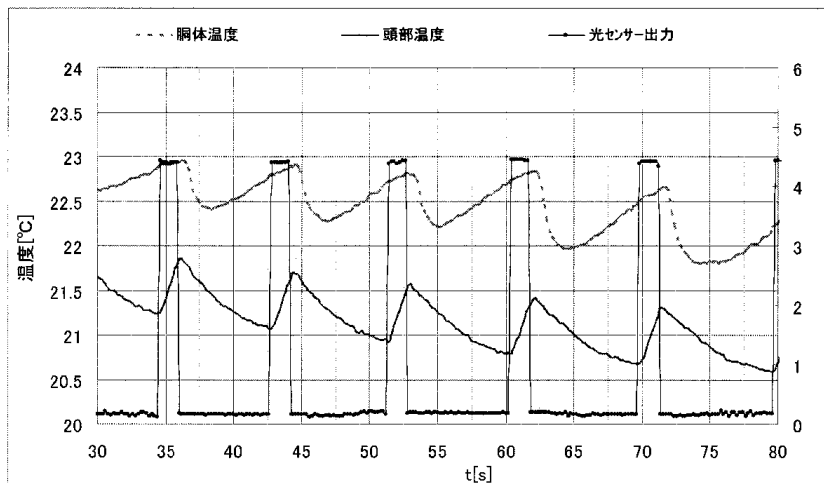


図12 温度の時間変化 (3)

図11に、測定後50～80秒の4周期分のデータを示す。このときの制御データは、

支点の高さ = 5.6cm (胴体底面から)

転倒角 $\theta = 14.4^\circ$

戻り角 $\beta = 30^\circ$

である。時間間隔が短いので、頭部の蒸気温度が転倒の周期に同期して変動することを含めて、現象は定常的であると考えてよい。ここでは、次のような特徴がある。

- ①頭部温度は胴体温度より約2～3K低い。
- ②頭部の蒸気温度が転倒時に上昇し、転倒後はすぐに低下する。これを繰り返す。
- ③胴体の方は、周期的変化をせずに単調に冷えていく。

転倒後、液柱の先端が胴体の液面が離れ、胴体の蒸気が頭部に流れ込む。そのため、頭部の蒸気に温度上昇が起こると考えられる。ただし、蒸気の混合は十分ではないように見える。このとき、頭部で凝縮、胴体で蒸発が生じて液柱の上昇が繰り返されるなかで定常的な周期的動作が行われていると考えるのが現時点の1つの仮説である。

3) モードの異なる定常状態

2009年度の物理学会秋季大会（環境物理分科会）で、桐山は以下のような予測を発表している¹⁹⁾。転倒時に、胴体と頭部の蒸気の混合の度合いにより3つのモードが考えられる。

作動モード（1） 一定の胴体温度，頭部温度で作動する。

作動モード（2） 一定の胴体温度，周期的に増減する頭部温度で作動する。

作動モード（3） 周期的に増減する胴体温度，頭部温度で作動する。

2) で示した例は、作動モード（2）である。その後の測定で、2) と同じ条件で、 $\beta=15^\circ$ にすると図12のような作動モード（3）が現れた。頭部の蒸気温度だけではなく、胴体の蒸気温度も転倒の周期に同期して変動する。

③ 胴体は、転倒後は一旦温度が低下するが、また上昇する。これを繰り返す。

転倒後は、2) と同様に胴体の蒸気が頭部に流れ込むとともに、蒸気の混合が十分に起こっていると考えられる。低温の頭部の蒸気が胴体に入って温度低下が起こり、その後の上昇は胴体が常温熱を吸収するためと見られる。しかし、頭部と胴体の温度変化は逆位相ではなく、頭部の温度低下の2～3秒後に胴体の温度上昇が見られる。図12の結果については、2009年度のエントロピー学会第27回シンポジウムで報告されている²⁰⁾。

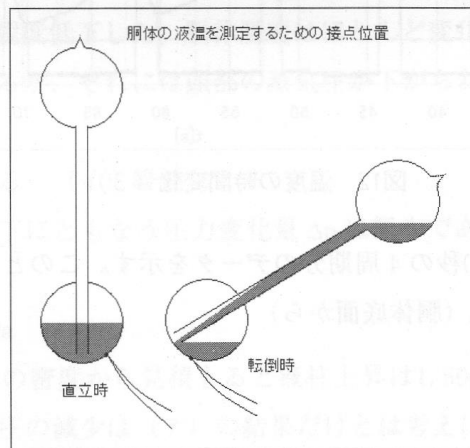


図13 胴体液温の測定

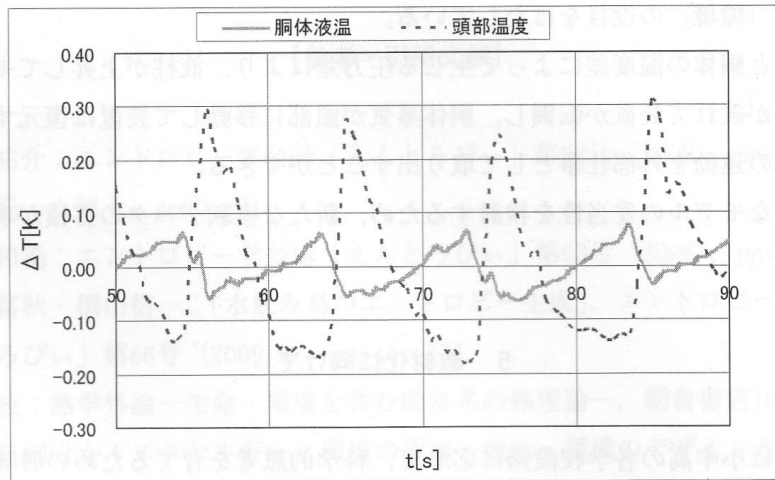


図14 胴体液温と頭部蒸気温度の傾向

4) 胴体の液温について

胴体の測定点を底近くにすると、直立中でも転倒中でも塩化メチレンの液体の温度をモニターすることができる。図14に結果を示す。図14では、温度の長期的な単調減少傾向の影響を取り除いてある。胴体の液温は、頭部の蒸気温度の時間変化とほぼ逆位相になっていることがわかる。頭部の蒸気温度が上昇するのは、高温の胴体の蒸気が頭部に流れ込むためであるが、このとき低温の頭部の液体が胴体に落下している。それ故、胴体の液温が低下すると考えられる。しかし、3)で述べたように、胴体の蒸気温度上昇は頭部の蒸気温度低下の2～3秒後に起こるのに対し、胴体の液温低下は胴体の蒸気温度上昇とほぼ同時に起こっていることが特徴的である。

5) 定常動作モデル

2)～4)で述べたような動作が可能となるモデルを以下に述べる(図15)。

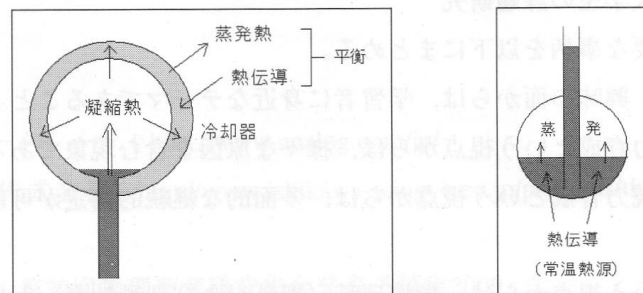


図15 水飲み鳥の熱源と冷却器

水飲み鳥を次のようなモデルで考える。

[I] 胴体蒸気の蒸発熱は、ガラス容器を隔てた周囲の空間(常温熱源)からの熱伝導による吸熱でまかなっている。

[II] 頭部に貼られた布は、水(または他の液体)の蒸発による放熱と布の周囲からの熱伝導による吸熱が平衡する温度を維持しながら、頭部の蒸気の凝縮熱を捨てるた

めの冷却器（環境）の役目をはたしている。

〔Ⅲ〕 頭部と胴体の温度差によって生じる圧力差により、液柱が上昇してモーメントの釣り合いが破れて装置が転倒し、胴体蒸気が頭部に移動して装置は復元する。このとき、装置の運動を外部仕事として取り出すことができる。

このようなモデルの妥当性を検討するため、新たな実験データの蓄積が求められている。

5 教材化に向けて

水飲み鳥は小中高の各学校段階に応じて、科学的思考を育てるための興味深いエネルギー教材である。以下、各学校段階における既習事項を踏まえながら、考えられる児童・生徒・学生の学習例を示す。

（1）小学校理科における学習

第6学年で「てこ」を学習しているので、周期的な転倒は「てこを傾ける働き」、「重力」で説明することができる。

（2）中学校理科における学習

中学では、気体の温度と圧力の関係について学習する単元がない。しかし、頭部と胴体の温度差が原因となって圧力差が生じ、液柱が上昇するのは定性的に理解できるのではないだろうか。その後の解釈は（1）と同様である。

（3）高等学校物理における学習

頭部と胴体はわずかな温度差なので、液柱上昇は理想気体蒸気の膨張・圧縮だけでは説明できない。高校生の段階では、（2）の内容に加えて胴体での蒸発、頭部での凝縮を考慮したモデルで現象を説明することになるだろう。

（4）高校生や大学生の課題研究

課題研究に必要な事柄を以下にまとめる。

- ①学習への関心・興味の面からは、学習者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（理科および理科教育）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行える。また、状態変化や力のモーメントなど学校理科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・大学生の課題研究例として十分に推奨できるものである。

【参考・引用文献】

- 1) 安田祐介：エントロピー学会誌「えんとりびい」第62号（2008），pp87-90
- 2) 白鳥紀一：同上，pp90-91
- 3) 川島和義：エントロピー学会誌「えんとりびい」第63号（2008），pp19-22
- 4) 黒川富秋・桐山信一：「水飲み鳥のエントロピー生成」，エントロピー学会誌「えんとりびい」第66号（2009.3），pp145-151
- 5) 槌田敦：熱学外論—生命・環境を含む開放系の熱理論—，朝倉書店1992，p109
- 6) 宿谷昌則ほか：エクセルギーと環境の理論—流れ・循環のデザインとは何か—，北斗出版2004，pp216-221
- 7) P. E. Richmond: “The Thermodynamics of a Drinking Duck”, Entropy in the school Proceedings of the 6th Danube Seminar on Physics Education sponsored by UNESCO, Balaton May 1983, pp215-227
- 8) J. Guemez, C. Fiolhais: “Experiments with the drinking bird”, Am. J. Phys. 71, pp1257-1263
- 9) 桐山信一，黒川富秋：第38回物理教育研究集会発表予稿集2008，pp 8 - 11
- 10) 桐山信一：「常温熱機関の周期的動作」，近畿の物理教育15（2009.3），pp 8 - 13
- 11) 桐山信一：第26回物理教育研究大会2009年度日本物理教育学会年会講演予稿集2008，pp66-67など
- 12) Wikipedia:<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%B4%E9%A3%B2%E3%81%BF%E9%B3%A5>
- 13) 水飲み鳥の運動：<http://ph1.ed.hiroshima-u.ac.jp/kojima/ideacard/ideacard/ph1-16/ph1-16.htm>
- 14) 前掲8)
- 15) 前掲10)
- 16) AD595データシート：<http://www.analog.com/jp/>
- 17) 石川産業株式会社：<http://www.ishikawa-sangyo.co.jp/products/thermocouples/index.html>
- 18) 桐山信一：第39回物理教育研究集会発表予稿集2009
- 19) 桐山信一：日本物理学会講演概要集第64巻第2号第2分冊2009年秋季大会，p 301，25aVE-2
- 20) 桐山信一，黒川富秋：2009年度のエントロピー学会第27回シンポジウム一般講演

The thermal characteristic of the normal temperature heat engine Drinking Bird.

—For the teaching materials of the school science—

Nobukazu KIRIYAMA

Abstract

For elucidation of the thermal operation of the drinking bird to examine the tendency of the periodic temperature change of the head and the body in detail, we measured the time when the drinking bird inclines and falls down, normal temperature (room temperature), difference of temperature of the head surface and normal temperature and difference of temperature of the body surface and normal temperature with an amplifier AD595 for exclusive use of the c.a thermocouple by a PC measurement at the same time. When we started the measurement, body temperature, the head temperature are the same as normal temperature (thermal equilibrium). If we do dripping of methanol to a drinking bird, it cools off slowly and the body and the head become lower than normal temperature together. The temperature of the head lowers than the body, vapor temperature of the head synchronizes in the period of the fall and changes. There is the following characteristic.

- ① *Head vapor temperature is lower than body vapor temperature at about 2~3K.*
- ② *When the drinking bird fell down, head vapor temperature rises and it falls immediately after having the drinking bird fallen down. It repeats this.*
- ③ *Body vapor temperature doesn't do a periodic change, body gets cold monotonously.*

The tip of the liquid column separates with a surface of liquid in the body after having fallen down, and the vapor of the high temperature in the body flows into the head. Therefore it is thought that head vapor temperature rises. Then the condensation occurs at the head and evaporation occurs at the body, and the rise of the liquid column is repeated, in this way, regular periodic movement is performed. It is one hypothesis of the present to think as above. The operation mode appeared afterwards which not only head vapor temperature but also body vapor temperature synchronized in the period of the fall. Vapor of the head at the low temperature flows in the body, so temperature fall happens. It is thought that the later temperature rise is so that the body absorbs the heat of the normal temperature. It is thought that the mixture of the vapor is performed enough with the mode of this operation.