

## 簡易水時計の研究

工藤 諒子<sup>1)</sup>・江口 公治

A Study of the Simple Water Clock

Ryouko KUDOU<sup>1)</sup> and Koji EGUCHI

### はじめに

小学校理科「A物質・エネルギー」では、物の性質を学習する内容が幾つかの単元で出てくる。第4学年では、「空気と水の性質」として、空気や水に力を加えて（閉じ込めて）、力学的性質を調べている。

身近な物質である水は、液体であることにより、空気のように自由に拡散することなく、また、体積を保存しながら、容器の形に応じた変形をする。そのような性質から、水（あるいは、それに代わる液体）は、力を伝達する装置（例えば水圧器（または油圧機））に利用されている。

水時計もまた、その性質を利用して、古くから時間を計測するものとして、作製・使用されてきた。水時計は、日時計と違って、天候や日光に左右されず時間を計測することができるという利点、または夜に時間を知る必要性から誕生したと言われている。古代の水時計はクレプシドラ（「水盗人」）と呼ばれる流出時計であった。発見された最古のものとしては、紀元前1400年頃のエジプトで使用されていた容器の内面に目盛りが付けられた水時計がある<sup>2)</sup>。その後、ギリシア・ローマに受け継がれて改良され、更に、インド・中国そして日本にまで伝わったと考えられる。

日本では、6月10日が時の記念日である。日本書紀に、660年、中大兄皇子が初めて水時計である漏刻を作って時を告げ、671年の4月25日、今の6月10日に漏刻を新天文台に据えて、鐘や鼓で時を知らせたと書かれている。奈良県高市郡明日香村にある飛鳥水落遺跡は、水時計を含む大がかりな構造物であったことが推測される（図1）。

中大兄皇子が作製させたという漏刻は、中国のものを模したと考えられる。多段式の装置で、最下段に溜まった水の量に応じて時間を示す指標が変化するようになっている。同史跡にある漏刻の説明図（図2）には、給水のための最上段の水槽から最下段まで、5段に及ぶ漏刻が描かれている。このように、古代は親しまれていた水時計であるが、冬には水が凍ってしまうこと、時間計測に手間がかかるなどといった問題もあり、また、正確な時間を刻むことのできる機械式の時計が発明されるに至り、次第に時計として製作・使用されることがなくなった。

1) 八幡東小学校 Yahatahigashi Elementary School

2) ゲルハルト・ドールン-ファン・ロッスム著 藤田幸一郎他訳「時間の歴史」大月書店1999



図1 奈良県明日香村飛鳥水落遺跡（著者撮影）

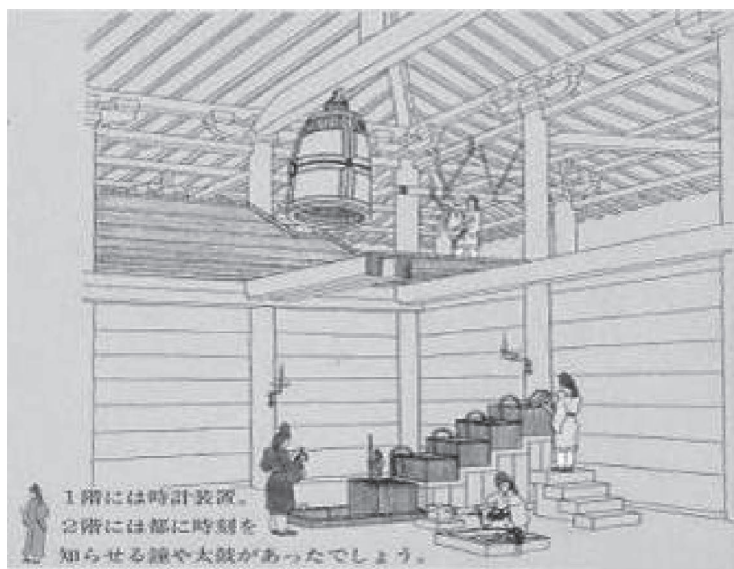


図2 同上から漏刻説明図（著者撮影、写真加工 Photoshop Elements）

明石市立天文科学館にある漏刻（図3）は4段式である。見かけのデザインは現代風にスマートであるが、明日香村にあるような多段式の古代の漏刻を模した物と考えられる。当館の学芸員に仕組みについて説明を求めると最上段の水位は常に一定になるように、自動的にコントロールされているのだそうだ。見かけは、古来の漏刻に似ているが、中身は現代のテクノロジーを使用しているものである。



図3 明石市立天文科学館の漏刻（著者撮影）

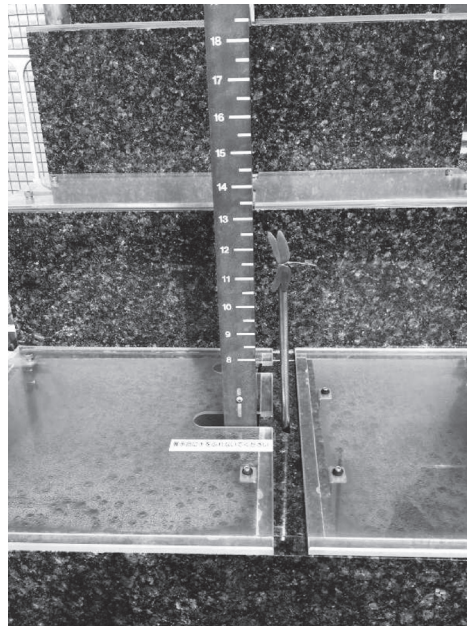


図4 同時刻目盛とトンボの指示模型

古来の漏刻が多段式であるのは、最上段から流れ出る流量は給水された液面の変化に依存することを緩和するためであったようだが、その後、流量を一定にするための工夫がなされ、正確に時を刻む水時計が作られるようになった。古代ギリシアのヘレニズム時代（紀元前3世紀）そして中国では南北朝時代（5世紀）に、水をオーバーフローさせることにより、水圧を一定にすることを可能にした。図5はブリタニカ百科事典に紹介されている同様の原理で動く水時計である<sup>3)</sup>。

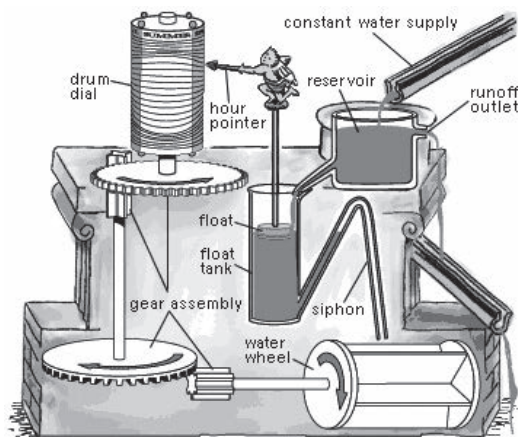


図5 オーバーフロー式の水時計（ブリタニカ百科事典）

3) <http://www.britannica.com/clockworks/clepsydra.htm>

この装置には、ギアを使用して時間を表示することができるような機械的な駆動部分も備わっている。中国の水時計においても同様に水の力を利用して機械的な動作を行うようなものがあったようで、東西を通じて類似した水時計の進歩をうかがい知ることができる。ガリレオも物体の落下の法則を調べる実験で水時計を使用したと言われる。おそらくそれは、短い時間を正確に測るストップウォッチの役目をしたと考えられる。水時計も初めに考えられたのは、そのような時間の間隔を測るものから出発している。本研究でも、身近な容器を使って、最もシンプルな構造である水時計を実際に作製して、時間を測る時計として機能するようなものができるかどうか調べてみた。

### I 簡易水時計の製作（オーバーフロー式）

身近な材料を使用して水時計を作製するために、仕組みと構造を簡単にした。水圧と水量を一定にするためには、オーバーフロー式を取り入れた。（あとで、分かったことだが、水をオーバーフローさせないで、水圧を一定にする方法もあった。）

その構造を模式的に描くと図6のようなになる。図でAは測定に必要な水を貯めておく貯水タンクである。2段目に水圧を一定にするために、容器の一部を切り欠いたものを設置する（B）。3段目（C）は時間測定のための容器となる。これらの容器には、ペットボトルを使用した。AとBには、大きめの2lの容器を使用し、Cには、500 ml または 2l の容器を用いた。その他の高さを調節するための台にも 2l のペットボトル容器を用いた。

このようにして作製した水時計の全体像は、時間測定に 500 ml 容器を使用した場合、図7のようになった。排水パイプには、外径 3 mm（内径 2 mm）のアルミ管と外径 6 mm（内径 4 mm）のビニール管をビニールテープで巻いたものを使用した（図8）。また、流量を調整するために、排水口を3カ所作った（図9）。3カ所の穴は、オーバーフローする液面から、ほぼ 1 cm おきにあげた。従って、図に見られる①と表記された最も低い位置は、水面から 3 cm、②は 2 cm、①は 1 cm となる。排水口は、実際に使用する際には、使用する孔以外は、セロテープでふさいで使用した。

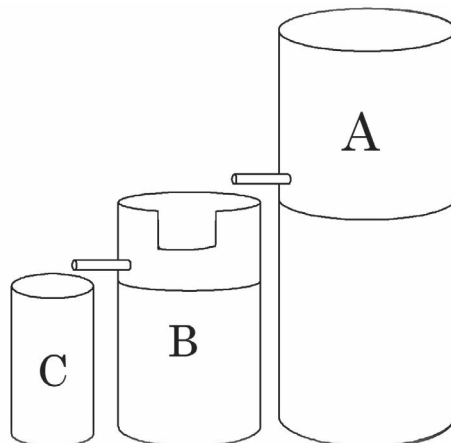


図6 オーバーフロー式水時計 模式図

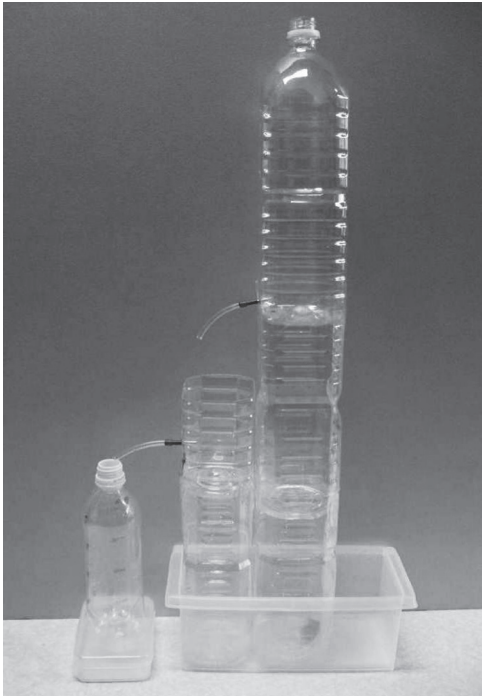


図7 オーバーフロー式3段水時計全体像

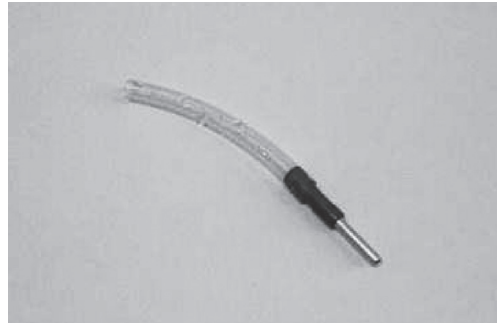


図8 排水パイプ

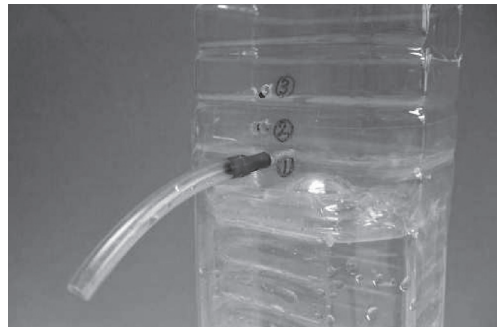


図9 水圧調整用の排水口

## II 水時計を使った計測実験

500 ml のペットボトルを計測用ボトルにした実験結果を表1に示す。表には、1分おきの3分間の水のたまる量を底面からの高さで示している。表からわかるように、予想されるように、①②③の順で、早く水がたまったことがわかった。

表1 500 ml 計測用ボトルによる貯水量 (底面からの高さの記録, 単位 cm)

	下 (①穴)	中 (②穴)	上 (③穴)
1分	5.0	4.5	3.8
2分	9.0	8.0	7.0
3分	13.0	11.6	9.9

この結果から、計測容器にたまった水の量を測ってみると、表2のようになった。更に、表2の測定値を使って、グラフに表わすと図10のようになった。グラフ中の数式は、原点を通る線形近似であり、各式の係数は1分間当たりの平均の貯水量となる。表において、この値は、3分間にたまった貯水量の平均とほぼ等しく、流量が計測中、時間的にほとんど変化しないことを示している。

表2 500 ml 計測用ボトルによる貯水量 (単位 ml)

	下 (①穴)	中 (②穴)	上 (③穴)
1分	139	125	100
2分	270	235	205
3分	393	350	295
平均 (3分間, 1分)	131	117	98.3
平均 (線形近似, 1分)	133	118	99.6

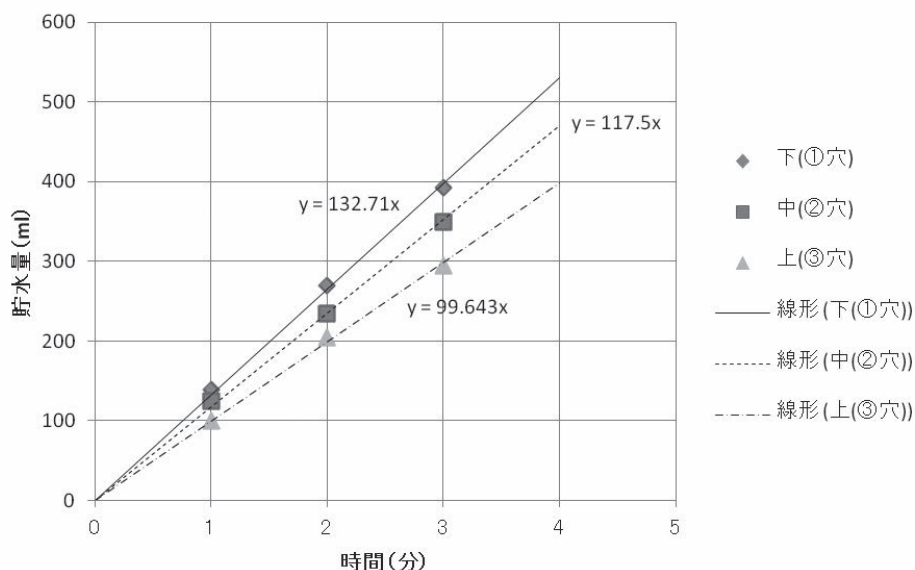


図10 500 ml 計測容器貯水量の時間変化と線形近似 (表計算ソフト Excel による)

表2において、最もゆっくりと時間をかけて水がたまるのは、最も上側にある③の穴で、1分間の貯水量がほぼ100 mlであることがわかる。

この結果を利用すると、20分で約21の水をためることができ、21のペットボトルを計測容器として20分間の時間を測定できる水時計を作製することにした。図11は、完成した21ペットボトルを用いた20分計である。ペットボトルに定規をセロテープでつけ、その横にセロテープを縦に長くはり、その上に時間をストップウォッチで計測しながら、1分ごとにマジックで時間を書き込んでいったものである。予想通り、ほぼ等間隔に時間を示し、20分の位置も、容器の最上部に近い位置に記すことができた。

この結果を利用してもっと長い時間が測定できる水時計を想定すると、1時間計が6lの容器を必要とし、1日計すなわち24時間計では144lの容器が必要となる。144lの容器は、60 cm × 40 cmの底辺の場合、60 cmほどの高さとなり、見かけ上、明石市立天文科学館に設置されているものと同程度の大きさである。同館にある水時計を見ると (図4)、時計の目盛りも朝の8時

から夕方 18 時の約 10 時間と、開館時間に合わせたような仕組みになっていて、夕方、閉館する際に水時計にたまった水を排水し、翌朝の開館時刻に再び注水を行うということだ。

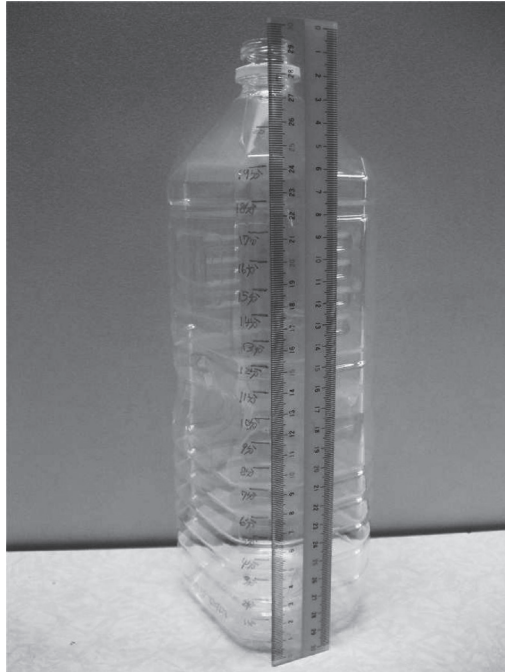


図 11 20 分計測用容器 (2L ペットボトル)

### Ⅲ 簡易水時計の製作 2 (マリオット式)

正確に時間を知らせる水時計を作るためには、流量を一定にする・・・即ち、水圧を一定にすることが必要である。オーバーフロー式の水時計は、その一つの方法であるが、水を絶えずあふれさせる必要がある。水圧を一定にするには、他に、マリオット (エドム・マリオット、フランスの物理学者、1620-1684) の考えた方法 (マリオットの器 (瓶) と呼ばれる) を利用することが考えられる。

図 12 は、マリオットの器を模式的に描いたもので、容器 A は 2 つのパイプの部分を除いて、密閉されている。この時、下側の排出用パイプからは、容器に上から差し込んだパイプの最下面との高さ  $h$  に比例した圧力に応じた流量の水が排出される。流量は、オーバーフロー式の水時計と同じく、A の容器の中の水位が、排出パイプと同じになるまで、一定の流量を保つことになる。この方法を利用して今回実験した水時計をここでは、簡便のために「マリオット式水時計」ということにする。

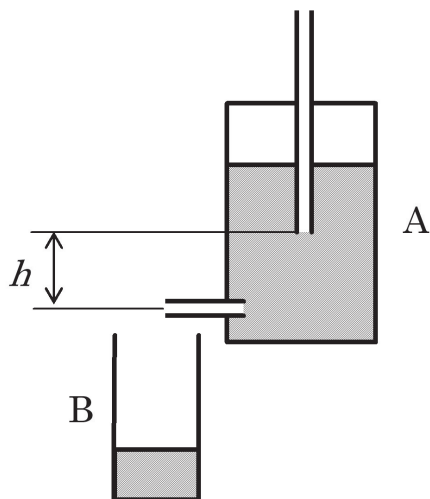


図12 マリオットの方法を利用した水時計（模式図）

図13は前出のオーバーフロー式の水時計の最上段の貯水タンクをそのまま利用したマリョット式の水時計である。排水パイプやペットボトルの容量などは同じである。ただし、排水位置は少し高めにして、キャップに差し込んだ水中にあるパイプ（水位調節パイプと以降は記述する）の最下面が排水パイプよりも下側にある場合の実験もできるようにした。図では水位調節パイプの最下面が排水位置よりも数 cm 下側にあることにより、水が流出しない状態になっている。この装置に、物差しを取り付け、水位差  $h$  による水の貯水量を調べてみた。

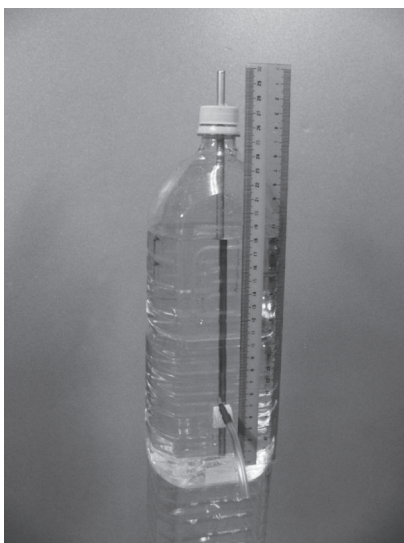


図13 ペットボトルを使ったマリョット式水時計（本体）



図 14 は中のパイプ最下面が排水位置より 5 cm ほど上にある状態で、測定を始める前は、モール型ピンチコックで排水用のビニール管を閉じている。測定を開始する際は、ピンチコックを開放し、アルミ管部分を挟むようにしている。図 15 は測定する際のセッティングを示したもので、排水された貯水量の測定には、11 のメスシリンダーを使用した。

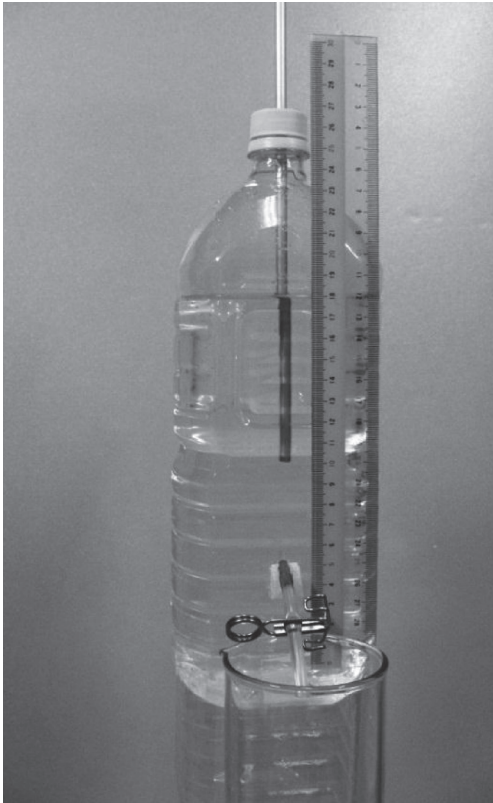


図 14 測定前のピンチコックで閉じた状態

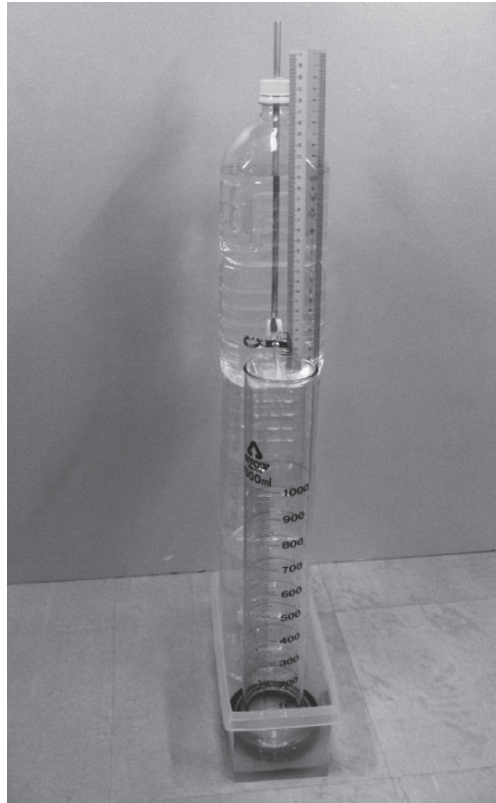


図 15 測定用セッティング

表 3 は上述のセッティングによって、水位差  $h$  が 5 cm と 10 cm の場合の 1 分間の貯水量を調べた結果である。中にあるパイプの位置を正確に読み取ることがむづかしく、測定を 2 回行った。測定中は、上部から差し込んだパイプの最下面から空気を補充すべく気泡が一定の時間間隔で出て、ペットボトルの密閉性があることを証明していた。それに対し、排出用のパイプからはペットボトルの穴の部分から水がにじみ出たが、測定結果には大きな影響は及ぼさなかった。

表 3 マリオット式水時計による水位差  $h$  と 1 分間の貯水量 (単位 ml)

	5 cm	10 cm
1 分	160,170	220,230
平均 (1 分)	165	225

## IV 考察とまとめ

## 1. オーバーフロー式の水時計

オーバーフロー式の水時計は、水面からの排水パイプの高さによって水圧および流速が決まる。その時の流速は、高さ  $h$  の場所から落下する自由落下と同じく、

$$v = \sqrt{2gh} \cdots (1) \quad (g \text{ は重力加速度})$$

となる。排水パイプの断面積を  $S$  とすると、1 分間当たりの流量  $Q$  は

$$Q = 60vS \cdots (2)$$

であるから、 $h$  を 1 cm とするとパイプの内径は 2 mm より、 $v = 0.443 \text{ (m/s)} = 44.3 \text{ (cm/s)}$ 、従って、 $Q = 44.3\pi \cdot 0.1^2 \cdot 60 = 83.5 \text{ (cm}^3/\text{分)}$  となり、実験の 1 分間当たり 98.3 および 99.6 ml の流量に近い値である。同様に、表 4 の最下段には、中および下の排水孔について、 $h$  が 2 cm および 3 cm とし、1 分間の流量を計算値として示したが、実験結果に近い値を示している。

表 4 オーバーフロー式の水時計の実験結果と計算値との比較 (単位 ml)

	下 (①穴)	中 (②穴)	上 (③穴)
平均 (3 分間, 1 分)	131	117	98.3
平均 (線形近似, 1 分)	133	118	99.6
計算値 (1 分)	144	118	83.5

## 2. マリオット式水時計

マリオットの方法を利用した水時計も、オーバーフロー式の水時計と同じように、2 つのパイプの位置の差  $h$  によって流量が決まる。

理論的な貯水量は、オーバーフロー式の水時計と同じ計算を行うと、 $h$  が 5 cm の時、 $v = 0.98 \text{ (m/s)} = 99 \text{ (cm/s)}$ 、および、 $Q = 99\pi \cdot 0.1^2 \cdot 60 = 187 \text{ (cm}^3/\text{分)}$  となる。また、 $h$  が 10 cm の時、同様の計算をすると、 $v = 1.4 \text{ (m/s)} = 140 \text{ (cm/s)}$ 、および、 $Q = 140\pi \cdot 0.1^2 \cdot 60 = 264 \text{ (cm}^3/\text{分)}$  となる。前出の実験結果との比較を次の表に示すと、計算値は 2 回のそれぞれの測定値  $165 \text{ cm}^3$  および  $225 \text{ cm}^3$  に近い値である。

表 5 マリオット式水時計による水位差  $h$  と 1 分間の貯水量 測定値と計算値 (単位 ml)

	5 cm	10 cm
測定値 (平均 1 分)	165	225
計算値 (1 分)	187	264

## 3. 水時計の流量計算 (まとめ)

オーバーフロー式にせよマリオット式にしても、水時計としては、特定の水位によって決まる

ことが分かったので、以下にまとめた。表6は、水位と流速および貯水量の関係を示している。

表6 水位による流量（計算値）

$h$ (cm)	$v$ (cm/s)	$Q$ (ml/m)
1	44.3	83.5
2	62.6	118.0
3	76.7	144.5
5	99.0	186.6
10	140.0	263.9

グラフにすると図16のようになる。水位の平方関数として、線形と比較するとかなり緩やかなカーブを描く増加となる（振り子の周期とふりこ長さの関係に似ている）。図中の関数の前の係数は、排水パイプの断面積ひいてはその内径から算出される。

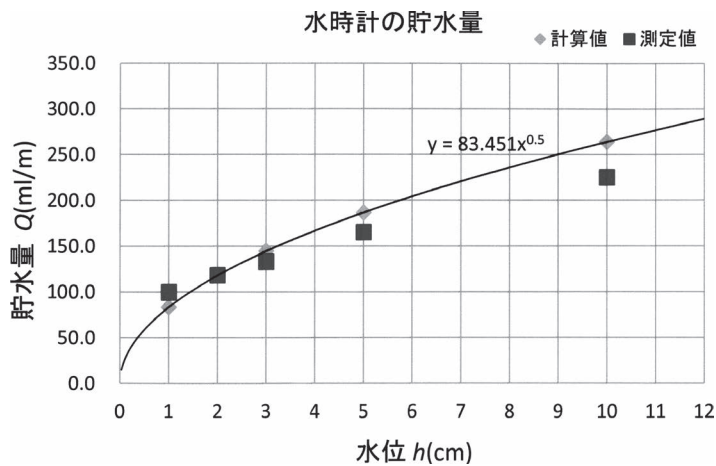


図16 水時計の水位と貯水量の関係

#### 4. マリオット式水時計の特異な振る舞い

マリオット式水時計では、2つのパイプの水位差によって、水の流出量が決まるとされている。確かに、排出パイプより3・4 cm 水位が高くなったり、低くなると流出が起きるあるいは止まるということが明確に起きることが分かり、その水位によって流出量も決まることが実験と計算で確認された。しかしながら、実験中では、水位が排出パイプの位置より下がり、流出が止まるはずのものが、止まらないということが観測された。逆に違うセッティングにおいては、排水されない位置のパイプを徐々に引き上げる際には、排出パイプの位置を中のパイプの最下面が越しても水の排出が起きないということも起きた。

排出パイプの位置近くの中のパイプの最下面がある場合、上述のような予想と違ったふるまいを示したのだが、このようなことは、他の事象で見られる現象をほうふつさせる。その例として

見られるのが、過沸騰や過冷却である。穏やかに熱エネルギー与えていると、沸点の100℃を超えても沸騰が起きないで、ある少しの刺激で急激な沸騰が起きたりするし、また、静かに熱エネルギーを取り除く冷却を行うと0℃以下になっても固化が起きなく（すなわち氷にならない）、何かの拍子で急に0℃に上昇するようなことが起きる。

このマリオット式の水時計においても排水状態かそうでないかどちらかの状態から、急に、逆側の状態に変化はしなく、ある程度の水位の変化が必要なようだ。水の排出が止まっている状態から排水が始まるには、排出パイプにおける水の表面張力と排出の水圧の大小関係、逆に、流出が起きている状態から、止まるには、その慣性を止めるだけのペットボトル内の負圧が必要というようなことが考えられる。

排出パイプ付近の位置近くに内側のパイプの最下面があれば、流出量を少なくして、決められた容器で長い時間の測定ができることが予想され、実際、オーバーフロー式で得られた毎分100ml程度の貯水量も観測できた。更に、中のパイプの最下面の位置を調節すると、なお少ない排出量であろうことも流出する水の様子から観測できた。しかし、中のパイプの最下面の位置を正確に測定することがむづかしいことと、上述のような特異な振る舞いと流出量の関係が明確でないことにより、微量の流出による水時計の実験は、科学的な解析が困難なことが予想され、今回は行わなかった。そのような実験を行うには、より正確にパイプの位置を決定できる装置で、かつ、密閉性等にもより厳格にして、条件を精査する必要がある。

## おわりに

水時計は、知られているだけでも、数千年前のエジプト王朝の時から実用に即したものとして使用され、中国・日本でも、時を知らせる重要な役割を果たしてきた。流れる水を利用して、時を知る有様は、現代の1秒を正確に刻むデジタル式の時間の経過と違って、時の流れもゆったりとした落ち着きを想像させる。

同じように、物質の移動を利用して時間を測定するものに、砂時計がある。3分間計のように、短い時間を測るものが身近にあり、即席ラーメンを温めたりする時間を測ったりするのに重宝する。また、時間を測ることを念頭に置いていないが、重さや粘度などの性質の異なる2種類の液体を透明なプラスチックのケースに入れて、液体が動く有様を楽しむものが土産物として販売されているのを見かける。

人はこのような動くものに興味を持ち、更には、科学的あるいは工学的に研究と工夫・改良を行い、さまざまな成果を産出していったようである。大阪駅には、水を使って時間だけでなく、どのような映像も水で再現するオブジェがある。他にも人が集まる場所には、大・小の水のオブジェを見ることが出来る。

噴水や人工的な池があると、何故か落ち着くのは、生命とのつながりを感じさせられるからだろうか？この先も、水や動くものを使った人に関心と癒しをもたらす身近な創造物が次々に出現してくることだろう。

学校においても身近な素材を使って作製と実験のできるユニークな教材として、水時計の製作は考えられる。マリオットの器の応用として、水やりの自動化がある。市販の小動物への自動の給水装置も市販もされているし、作製も容易である。植物への自動給水装置も原理は似ている。このように応用された実際に役立つものを教材として製作することも考えられる。

### Summary

Two type's simple water clocks were made. One is made by using over flow technic. And the other is made by using the idea developing by Edme Mariotte (1620-1684, in French).

The two type's water clocks worked as the correct real clocks. The experimental results and the calculations for the clocks were relatively good. On the other hand, the Mariotte clock showed the curious behavior around the particular water level like the phenomena of supercooling and superheating of the water.

[2012. 9. 27 受理]