

論文 : Paper

## 大気圧を体験する実験 Experiments aimed at experiencing atmospheric pressure

木村隆良、新居毅人  
Takayoshi Kimura and Takahito Arai

近畿大学理工学総合研究所  
*Science and Technology Research Institute, Kindai University*

( Received May 8, 2023 )

### 概要

大気圧とは、地球上にある  $5.3 \times 10^{18}$  kg の大気（空気）の重さによる圧力のことである。普段感じることはないが、 $1\text{m}^2$  あたりで 10 トンの重さを受けながら我々は生活をしている。本論文では、この大気圧を理解するための身の回りにある簡単なものを用いたいくつかの実験方法を示した。また、我々が実施した出張実験でのアンケート結果を示す。これら活動では、受講者の基礎知識のレベルの違いはあるものの大半の理解が得られた。

### Abstract

Atmospheric pressure is pressure exerted due to the weight of the atmosphere (air). On Earth, atmospheric pressure is  $5.3 \times 10^{18}$  kg. However, we do not feel atmospheric pressure in our usual environment; in fact, we live with a weight of 10 tons per  $1\text{m}^2$ . This paper presents several experimental methods for understanding atmospheric pressure using simple daily-life objects. Additionally, we administered a questionnaire in our experimental science classes and found a difference in the level of basic knowledge among the participants, with the majority understanding the experiments.

## 1 はじめに

広辞苑には、圧力とは“物体が他の物体を押す力。物理では二つの物体が接触面を境にして、互いにその面に垂直に押し合う単位面積当たりの力をいう。”と記載されている。古代ギリシアで万学の祖と言われているアリストテレスは、「自然は真空を嫌う」とした。“何も存在しない状態は存在しない。”というこの仮説の誤った理解の信奉により、2000 年もの長い間科学の発展は阻害された。<sup>1)</sup> ガリレオの弟子トリチェリは、作成した水銀圧力計で真空と大気圧の存在を証明する実験を 1643 年に行った。<sup>2)</sup> 真空といっても絶対真空と負圧（大気圧より低い）がある。宇宙は真空と言っても、地上から 400 km 離れている宇宙ステーションの位置での圧力は  $10^{-4}$

Pa から  $10^{-5}$  Pa、人口衛星の位置での圧力は  $10^{-8}$  Pa、銀河系宇宙での圧力は  $10^{-11}$  Pa と言われており、そこでは  $2 \times 10^{11}$  個/ $\text{m}^3$  ( $2 \times 10^5$  個/ $\text{cm}^3$ ) 程度の分子が存在していることになる。

ロバート・フックは、光の波動説において光が波動（横波）として伝搬するために必要な媒質であるエーテルが宇宙に満ちていると仮定した。アインシュタインは、エーテルの概念を否定して空間自体が電磁波を伝える性質を持つと考えた。1970 年代後半には渦巻き銀河の回転速度分布を観測して、銀河内の明るい星や星間ガスではない、光では観測できないが重力を感じる物質であるダークマターがあり、<sup>3)</sup> 宇宙では 27 % を占めているとされている。

表 1: 基本単位

	長さ	質量	時間	電流	熱力学温度	物質質量	光度
量の記号	$l$	$m$	$t$	$I$	$T$	$n$	$I_V$
SI の名称	metre	kirogram	second	ampere	kelvin	mole	candela
SI 単位記号	m	kg	s	A	K	mol	cd

## 1.1 圧力の定義

国際単位系 (SI) では、表 1 の 7 つの基本単位をベースにしてからいわゆる組立単位が作られている。<sup>4)</sup> 圧力の大きさは、単位面積当たりに働く力で表される。力の単位は Newton の運動の法則により、

力 = 質量 × 加速度 →  $\text{kg m s}^{-2} = \text{N}$  (Newton) となる。よって、圧力の単位は

圧力 = 力 ÷ 面積 →  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2} = \text{Pa}$  (Pascal) となる。圧力の単位としては、mmHg、cmHg、mm 水柱、bar、mbar、atm、pound/inc<sup>2</sup>、kg/cm<sup>2</sup> など、いろいろな単位が使われてきたが、1999 年移行期間の終了とともにそれまでの古いすべての単位の使用ができなくなり、Pa 表記になった。表 2 によく使われる接頭語と古い圧力単位の換算を示した。

表 2: 接頭語と古い単位の Pa 換算

1 kPa	1000 Pa
1 MPa	1000000 Pa
1 bar	100000 Pa
1 atm	101325 Pa (0.10 MPa)
1 kgf/cm <sup>2</sup>	98066.5 Pa
1 mH <sub>2</sub> O	9806.65 Pa
1 mmH <sub>2</sub> O	9.80665 Pa
1 mmHg	101325/760 Pa

## 1.2 大気圧の証明

大気圧の定量的な実験として、トリチェリーは片方を閉じた 1 m のガラス管内に液体の水銀を入れてその高さが 76 cm になる、いわゆるトリチェリーの真空を見出した。実際には、トリチェリーの真空は水銀の飽和蒸気圧 (25 °C、0.265Pa) である。山麓と山頂では水銀柱の高さが違うことなどを見出している。しかし、空気は見

えないので一般にはこの概念は広がらなく、マグデブルグ市の市長であったオットー・フォン・ゲーリケ (Otto von Guericke) の公開実験まで待つことになる。この実験は「マグデブルグの実験」としてよく知られている。<sup>5)</sup> ゲーリケは、1650 年に真空ポンプを発明した。1654 年 5 月 8 日にレーゲンスブルクの帝国議事堂前において行った公開実験では、真空ポンプで空気を抜いた 60 cm の 2 つの半球を左右各 8 頭の馬が双方から引っ張って半球を外すことで真空の存在を明らかにし、空気に重さがあることが原因になっていたとした。

## 1.3 圧力計

圧力計には、大きく分けると液柱型とアネロイド型の 2 種があり、トリチェリーの水銀気圧力計が起源とされている。その後、エンジンインジケータ、重錘形圧力計、ブルドン管、ベローズ、チャンバー、ダイヤフラム圧力計などの機械式圧力計と、ピエゾ、ストレージゲージ、電気抵抗、静電気容量、電位差、インダクタンスなどを利用した電子式の 2 次圧力計と言われるものが開発され活用されている。

水銀圧力計は、断面積が  $1 \text{ cm}^2$  ( $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ) の円柱の上に 76 cm (0.76 m) の水銀 (温度 0°C での密度  $13595 \text{ kg/m}^3$ )<sup>6)</sup> が乗っているため、水銀の体積は  $76.0 \text{ cm}^3$  ( $7.60 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ )、その重さは  $7.60 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \times 13595 \text{ kg/m}^3 = 1.0332 \text{ kg}$  となる。重力加速度の大きさは  $9.80665 \text{ m/s}^2$ <sup>7)</sup> であるため、水銀にかかる重力の大きさは  $10.1324 \text{ N}$  となる。よって、大気圧の大きさ  $P$  は、

$$\begin{aligned} P &= 10.1324 \text{ N} / 1 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \\ &= 101324 \text{ Pa} = 0.101324 \text{ MPa} \end{aligned}$$

となる。定義では 101325Pa とされている。

実際、圧力は超高真空から超高圧まで測定される。それらの測定する圧力範囲によって使われる圧力計が異な

る。高圧から中圧までは重錘型圧力計、高圧から常圧はアネロイド型のブルドン管型、低圧から高真空は力学的、輸送、電離型など異なる原理があり、表3に示した。表3の圧力範囲は大枠であり、個々の装置によって異なる。超高圧では、ルビーの蛍光や結晶構造のX線回折による方法などがある。圧力計の解説は多くの文献があるので省略する。<sup>8)</sup> 現在は、地球の中心圧力である364 GPaの超高圧も実験室レベルで研究されている。

表3: 圧力計の原理と測定範囲

原理		圧力範囲 /Pa
力学	重錘型圧力計	1 から $10^7$
	ブルドン管圧力計	$10^2$ から $10^5$
	マノメーター	$10^2$ から $10^5$
	マクラウド真空計	$10^{-2}$ から $10^2$
	隔膜真空計	$10^{-2}$ から $10^5$
輸送	熱電対真空計	$10^{-1}$ から $10^2$
	サーミスター真空計	$10^{-1}$ から $10^5$
	ピラニ真空計	$10^{-1}$ から $10^3$
	ガイスラー管	$10^{-1}$ から $10^4$
電離	ペニング	$10^{-4}$ から 1
	マグネトロン真空計	$10^{-10}$ から $10^{-2}$
	質量分析	$10^{-8}$ から $10^{-2}$

## 1.4 空気の重さ

標準大気圧は1013.25 hPaとされている。概算で計算すると以下ようになる。図1のように、 $1 \text{ m}^2$  の円の上に大気圏100 kmの空気があり、成層圏では $-56 \text{ }^\circ\text{C}$ で1 Pa以下となる。実際の地表には、 $1 \text{ m}^2$  の上には10.3 tの重量がかかっていることとなる。

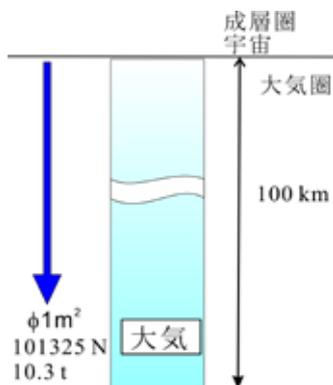


図1: 大気モデル

## 1.5 空気の重さ – 理想気体

理想気体の状態方程式を  $25^\circ\text{C}$ 、 $1013.25 \text{ hPa}$  で計算すると、 $1 \text{ L}$  の空気の重さは  $pV = (m/M)RT$  より、

$$m = (101325 \text{ Pa} \times 0.001 \text{ m}^3) / \{(28 \times 0.8 + 32 \times 0.2) \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \times 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1} \times 298.15 \text{ K}\} \approx 1.42 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

となる。ここで、 $M$ 、 $R$ 、 $T$  はそれぞれ分子量、気体定数、絶対温度である。

## 2 実験

万物の根源（アルケー）は古代ギリシャ時代の4元説以前から色々提唱されたが、アナクシメネスは空気であるとした。その後、エンベンドクレスによって火、空気、水、土の4元説が唱えられ、アリストテレスの温、冷、湿、乾の4つの性質を入れた物質は転換するという考え方が西洋世界で主流となった。空気の存在は日ごろ感じないが、人は1日  $14 \text{ m}^3$  の空気を吸って吐いている。向かい風で走ったり、強い風、台風などの時は、空気の流れからその存在を感じることができる。また、扇子や団扇の大きさで空気の抵抗が違うことなどを体感することもできる。此处では、空気の単位面積当たりの重さである大気圧の実験について、身の回りの簡単な治具などを使ったものをまとめた。

### 2.1 空気の重さを確かめる実験

#### 2.1.1 さお天秤法

##### 使用器具

15 cm から 20 cm の風船2個、50 cm 程度の丸棒（さや箸などでも可）、ダブルクリップ、テグスなどの紐

##### 実験

- (1) 図2のように棒の両端にテグスなどを付けたダブルクリップをとりつける。
- (2) 天秤棒の真ん中（支点）にもテグスなどを取り付け、さお天秤を作り、左右のバランスをとる。

- (3) 膨らませた風船を両側のダブルクリップで止め、天秤のバランスをとる。(図2左)
- (4) 図2の右のように片方の風船から空気を抜く。
- (5) 風船から空気を抜くことにより中の空気の重さが減り、天秤のバランスが崩れることにより空気に重さがあることが理解できる。理想気体では標準大気圧の空気の密度は25°Cで1.42 kg/m<sup>3</sup>であるので、3 Lの風船を使うと図2の右図では左右で4.3 gの重さの差があることになる。

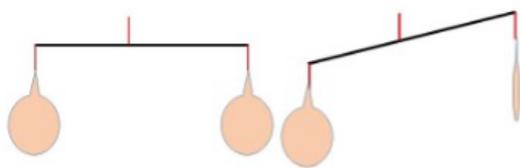


図2: 天秤法：左 両風船に空気：右 左風船のみ空気

### 2.1.2 ゴムボール法

#### 使用器具

直径10-30 cm ゴムボール、空気入れ、天秤

#### 実験

- (1) ゴムボールの空気をぬき、秤量する。
- (2) ゴムボールに十分な加圧状態で空気を入れて秤量する。
- (3) (1)、(2)の重量差から空気が入ることで重量が増加し、空気が重さを持つことが確認できる。

### 2.1.3 ペットボトル法1

#### 使用器具

500 ml から2 Lのペットボトル、天秤(感度0.05 g以上)、空気入れ、錐、自転車のチューブ用バルブ

#### 実験

- (1) ペットボトルの蓋を錐で穿孔する。
- (2) 自転車のチューブ用バルブを入れて接着剤で止め、固定する。
- (3) この蓋をペットボトルにしっかりと止め、その重さを秤量する。

- (4) 次に空気入れでペットボトルに空気を注入して加圧する。
- (5) 加圧されたペットボトルの重さを秤量すると、封入された空気の量に応じた重さが増える。

### 2.1.4 ペットボトル法2

#### 使用器具

500 ml から2 Lのペットボトル、天秤(感度0.05 g以上)、吸引ポンプ(注射器、ぺちゃんこポンプなどでもよい)

#### 実験

- (1) 空気の入った500mlから2Lのペットボトルの重さを秤量する。
- (2) 吸引ポンプでペットボトルの空気を抜く。
- (3) 空気の抜けたペットボトルの重さを秤量。
- (4) 減量したことから空気に重さがあることを知ることができる。

## 2.2 空気の密度の測定

#### 使用器具

酸素、窒素などの実験用ガスの空き缶、天秤(感度0.05 g以上)、加圧ポンプ(100円ショップのものでよい、使い切りのPCの注射器でも自作できる)、水桶、φ4 mmの肉厚ホース、500 mlから1000 mlのメスシリンダー

#### 実験

- (1) 実験用ガスの空き缶を秤量する。
- (2) ガスの噴き出し口からポンプを使って気体を注入したのち秤量すると注入した分の気体分の重量が秤量できる。
- (3) 充填した実験用ガスの空き缶にガス取り出しパイプを取り付け、図3のように水を充填したメスシリンダーを使って水上置換法で取り出した空気の体積を測る。空気の水への溶解度があるので予め使う水は空気飽和しておいてもよい。

- (4) 実験用ガスの缶の減量した質量  $m$  [g] とメスシリンダー中の空気の体積  $V$  [cm<sup>3</sup>] から、空気の密度  $\rho$  は、 $\rho$ [g/cm<sup>3</sup>] =  $m/V$  で決定することができる。

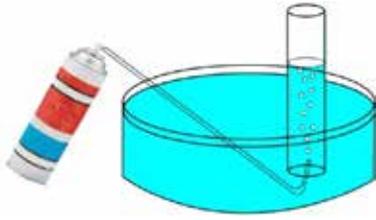


図 3: 実験用ガス缶による水上置換

## 2.3 圧力の理解

圧力が単位面積当たりの力であることを確認する。

### 2.3.1 紙コップを使った圧力実験

#### 使用器具

90 ml 程度の紙コップ、合板 (60 × 60 cm<sup>2</sup>、厚み 5 mm 程度)

#### 実験

- (1) 紙コップ 1 個を合板に挟んで人を載せる。紙コップがつぶれる。
- (2) 図 4 のように、25 個の紙コップを合板で挟み人を載せる。人が合板の上に乗っても紙コップはつぶれることはない。
- (3) 成人男性の平均体重は 64 kg<sup>9)</sup> であるので、紙コップ 1 個あたりにかかる質量は、

$$64 \text{ kg} / 25 \text{ 個} = 2.56 \text{ kg/個}$$

となる。

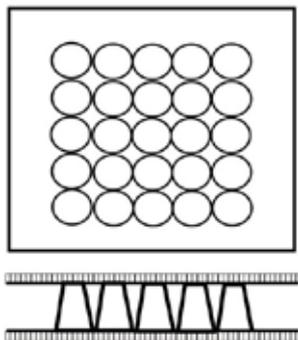


図 4: 紙コップの圧力実験

### 2.3.2 釘を使った圧力実験

#### 使用器具

釘、合板 (30×30 cm<sup>2</sup>、厚み 5 mm 程度)、風船

#### 実験

- (1) 膨らませた風船を 1 本の釘の上に乗せて、押しつけ割れることを確かめる。
- (2) 図 5 のような剣山状のものに風船を押し付けると風船が割れない。
- (3) 同様に人が素足で乗る (静かに横すべりしないように乗ること) と釘が刺さらない。
- (4) 風船あるいは素足の面積当たりの釘の数から釘 1 本あたりにかかる質量を計算すると人の足の裏の平均面積は 174 cm<sup>2</sup> であるので、<sup>10)</sup> 両足の面積  $174 \times 2 = 348 \text{ cm}^2$  には約 1392 本の釘の上に男性の平均体重 64 kg<sup>9)</sup> がかかる。足の裏に掛かる圧力は、

$$64 \text{ kg} \times 9.8067 \text{ m s}^{-2} / 348 \text{ cm}^2 = 18 \text{ kPa}$$

となり、これは大気圧の 18% 程度である。



図 5: 圧力-釘板 (30×30 cm<sup>2</sup> に 3600 本の釘)

## 2.4 大気圧でコップなどの水がこぼれない

大気圧はあらゆる方向から均等にかかっている。コップやペットボトルなどの身の回りのモノを使って確かめることができる。

### 2.4.1 厚紙、厚手のプラスチック板法

#### 使用器具

ワイングラス (またはコップなど)、厚紙、厚手のプラスチック板

## 実験

- (1) ワイングラス（またはコップなど）に水を溢流するまで入れる。
- (2) 空気が入らないように厚紙あるいはプラスチック板をワイングラスの上に載せる。
- (3) 厚紙あるいはプラスチック板を押しながらワイングラスを上下逆さ向ける。
- (4) (3) を水の入った別のワイングラスの上に重ねると、図6のようなこともできる。上のワイングラスを引き上げると下のワイングラスも同時に引き上げられる。

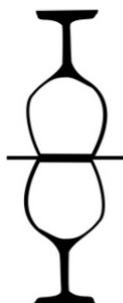


図 6: ダブルワイングラス

### 2.4.2 メッシュ法

#### 使用器具

コップ、ワイングラスなど、アク取（目の細かいものが良い）、大きめのボールなど

#### 実験

- (1) コップ、ワイングラスなどに水を溢流するまで入れる。
- (2) 水の入ったコップ、ワイングラスなどの口を水の入ったボールなどの水中で口をアク取で蓋をする。
- (3) 水中からコップ、ワイングラスなどを斜めにしないでまっすぐ、アク取と共にゆっくり引き上げる。
- (4) 表面張力と大気圧の力で、ワイングラスから水はこぼれない。

### 2.4.3 ペットボトル法

#### 使用器具

ペットボトル（500 ml、炭酸飲料などのもの）、プラカップなど

## 実験

- (1) ペットボトルに水を入れる。
- (2) ペットボトルの水をプラカップ等に移す際、ペットボトルの口をプラカップの中の水面に付ける。
- (3) 大気圧の力により、ペットボトルの水はこぼれない。

### 2.4.4 穴をあけたペットボトル

#### 使用器具

ペットボトル（500 ml、炭酸飲料などのもの）

#### 実験

- (1) ペットボトルの底に小さな穴をあける。
- (2) 穴を指で蓋をして水を入れる。
- (3) ペットボトルのキャップの無い状態で、穴を指で蓋をしたままペットボトルを逆さにしても水はこぼれないが、指の蓋を外すと水は勢いよくペットボトルから抜け出す。

## 2.5 真空リフター

### 2.5.1 吸盤

#### 使用器具

吸盤、塩ビ板

#### 実験

- (1) 吸盤を塩ビなど表面の綺麗な板に押し付け、内部の空気を抜く。
- (2) 吸盤を引っ張っても外れないが、吸盤の中に空気を入れるとはずれる。

### 2.5.2 ゴム板で机を引き上げる

#### 使用器具

5 mm 程度の厚みの  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  程度のゴム板、鍋蓋取手

#### 実験

- (1) ゴム板の中心に穿孔し、鍋蓋取手を取り付ける。
- (2) 机など平面にゴム板を取り付け、鍋蓋取手を引っ張る。机などが引き上げられるがゴム板は外れない。吸盤と同じ原理である。

### 2.5.3 重い金属塊が持ち上がる

#### 使用器具

金属円柱（使ったのは 11.4 kg の真鍮）、内径の均一なアクリル管、真空ポンプ（大型注射器）、真空ホース、真空計（高度計でもよい）、天秤、ボーリング球（プロ向け 16 ポンド（7.3 kg）等、重いものが良い）

#### 実験

- (1) 図 7 のような上蓋付きのアクリル管を作成する。  
金属円柱の外側は O リングを 2-3 重に取り付け、アクリル管との密閉度を保つ。
- (2) 金属円柱、ボーリング球などを体感でその重さを体験し、天秤で実測する。
- (3) 金属円柱の上に真空計を設置する。
- (4) アクリル管内に金属円柱（著者が使ったのは半径 100 mm）をいれ、アクリル管上部の蓋から真空ホースで接続した真空ポンプで減圧し、その圧力を計測する。
- (5) 金属円柱は注射器のピストンの役目をしており、金属円柱の下側は大気圧であり、上側が減圧状態である事を確認する。 $11.4 \text{ kg} \times 9.8067 \text{ m s}^{-2} \simeq 112 \text{ kg m s}^{-2}$  の力が  $3.14 \times 0.10^2 = 0.0314 \text{ m}^2$  の金属円柱の面に掛かっている。つまり、金属円柱の上下の圧力差が  $112 \text{ N} / 0.0314 \text{ m}^2 \simeq 3.56 \text{ kPa}$  で釣り合っている。（この時のアクリル管内の圧力は  $101325 - 3558 = 97767 \text{ Pa} \simeq 978 \text{ hPa}$  であり、これは海拔約 300m 程度の大気圧に相当する。）ちなみに、およそ 400 t のジャンボジェット機を浮かせる圧力差は 6.4 kPa である。<sup>11)</sup>

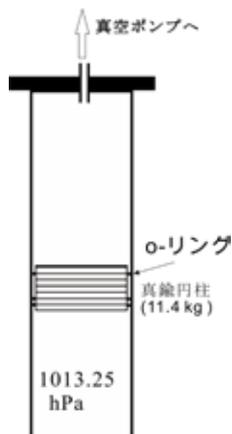


図 7: 真空リフター

### 2.6 空き缶つぶし

#### 2.6.1 アルミ缶つぶし 1

##### 使用器具

300-500 ml のアルミ缶プルトップ型、ガスバーナー、水桶、アルミ缶用 tong、金網

##### 実験

- (1) プルトップなどを除いたアルミ缶に 1/4 程度水を入れ、金網上で中の水が沸騰するまで加熱する。
- (2) アルミ缶を tong でつかみ、プルトップ側を直ちに水桶に入れる。
- (3) アルミ缶に勢いよく水が入るが、中の気体の冷却による体積減少の速度が速いため、大気圧との圧力差でアルミ缶が勢いよくつぶれる。

#### 2.6.2 アルミ缶つぶし 2

##### 使用器具

300-500 ml のアルミ缶ネジ蓋型、ガスバーナー、水桶、アルミ缶用 tong、金網

##### 実験

- (1) アルミ缶のネジ蓋に  $\phi 2 \text{ mm}$  程度の穴をあける。
- (2) アルミ缶に 1/4 程度の水を入れる。
- (3) アルミ缶のネジ蓋をして金網の上で加熱、水を沸騰させる。
- (4) アルミ缶を tong でつかみ、ネジ蓋側を直ちに水桶に入れる。
- (5) アルミ缶内の空気が冷やされ、体積が減少し、内圧が大気圧より低くなるがネジ蓋に開けた細孔が小さいので、大気圧とアルミ缶内の圧力差によりアルミ缶がつぶれる。

#### 2.6.3 一斗缶つぶし 1

##### 使用器具

一斗缶、ガスバーナー、水受け、バケツ、軍手など

## 実験

- (1) 子どもや大人などに一斗缶を腕力でつぶれないことを確認させる。
- (2) 一斗缶に1/5程度の水を入れ、ガスバーナーで加熱、中の水を沸騰させる。
- (3) 十分沸騰したところで、ガスバーナーの火を止め、一斗缶にキャップをする。
- (4) このまましばらく置いておくと一斗缶内の温度が下がり、中の空気の体積が減少し始め、内圧が大気圧よりも下がり一斗缶がつぶれ始める。一斗缶の外から水で冷やすと急激に内圧が減少し、一斗缶が激しくつぶれる。
- (5) 内圧は飽和水蒸気圧になる。一斗缶の表面積はおおよそ、 $0.25^2 \times 2 + (0.35 \times 0.25) \times 4 = 0.475 \text{ m}^2$  であるので、一斗缶は  $101325 \text{ Pa} \times 0.475 \text{ m}^2 = 48129 \text{ N}$  の大きな力を受けつぶれる。

### 2.6.4 一斗缶つぶし2

#### 使用器具

一斗缶、真空ポンプ、真空ホース、圧力計

#### 実験

- (1) 一斗缶に圧力計を挿んで真空ホースで真空ポンプにつなぐ
- (2) 圧力計を見ながら真空ポンプで一斗缶内をゆっくりと減圧する。
- (3) どの程度の減圧で一斗缶がつぶれるのかを確認する。

## 2.7 家庭にある真空保存容器を使った簡単な真空実験

### 2.7.1 風船を使った実験

#### 使用器具

真空保存容器、減圧手動ポンプ、気圧計、風船、マシュマロ

#### 実験

- (1) 真空保存容器に1/3程度膨らませた風船と気圧計を入れて密閉する。

- (2) 気圧計を読みながら減圧手動ポンプでゆっくりと減圧すると風船が膨らみ、大気圧に戻すと風船がしぼむ。
- (3) (1)の風船の代わりにマシュマロを入れると、減圧下ではマシュマロが大きくなる

### 2.7.2 圧力バランスの実験

#### 使用器具

真空保存容器、減圧手動ポンプ、気圧計、スチール缶（開封したもので、中の液体はコーヒーなど色の濃いものが良い）

#### 実験

- (1) 逆にした真空保存容器に色の濃い液体の入ったスチール缶を気圧計と共に入れ密閉し、真空保存容器を正常位に戻す。2.4と同じ原理で濃い色の液体がスチール缶から出てこない。
- (2) 減圧手動ポンプでゆっくり減圧にすると、濃い色の液体がスチール缶から出てくる。
- (3) 真空保存容器の中を大気圧に戻すと色の濃い液体はスチール缶にもどる。

### 2.7.3 圧力バランスの実験 – スポンジ

#### 使用器具

注射器（25-50 ml）、スポンジ（5 mm 角）

#### 実験

- (1) 注射器にスポンジを入れてピストンを出し入れする。
- (2) スポンジの入った注射器の針を刺すところを指で蓋をしてピストンを出し入れすると、注射器内の圧力の変化によってスポンジの大きさが変わる。

### 2.7.4 圧力バランスの実験 – ストロー1

#### 使用器具

ストロー、水、コップ

## 実験

- (1) コップに水を入れ、ストローを水に差し込み、引き上げる。
- (2) 水を入れたコップにストローを差し込み、ストローの口を指で蓋をして引き上げる。水がストローからでない。
- (3) (1)、(2) から大気圧が働くことにより (2) の実験では水がこぼれないことがわかる。
- (4) 太いストローで (2) の操作をすると水がこぼれる。水の表面張力の問題で、「2.4.2 メッシュ法」と同じ原理である。
- (5) (4) の実験の追試実験は、ストローの真中に孔をあけ、(2) の実験をする。ストローの穴の上下での水の様子の違いから、大気圧の効果が理解できる。



図 8: ペットボトルバランス

### 2.7.5 圧力バランスの実験 – ストロー 2

#### 使用器具

ストロー（長いホースでも可）、ペットボトル、水、コップ、接着剤

#### 実験

- (1) ペットボトルの蓋に孔をあけストローを取り付け、接着剤で固め真空漏れがないようにする。(図8) ついで、ペットボトルの底に小さな穴をあけて置く。
- (2) ペットボトルに水を入れ、ストローの付いた蓋を取りつけ、水の入ったコップにストローの先を浸け、ペットボトルの底の穴を指で押さえて、ペットボトルを倒立する。
- (3) (2) の実験では水がペットボトルから出ない。
- (4) 指で蓋をしたペットボトルの底の穴から指を滑らせ、少し空気を入れ、穴を指で蓋をする。
- (5) ペットボトルの底の穴から指を取ると勢いよく水が出てくる。

### 2.7.6 ペットボトルによる圧力バランスの実験 – 加圧実験

#### 使用器具

ペットボトル (500 ml、1 L あるいは 2 L)、お湯

#### 実験

- (1) ペットボトルにお湯を入れ、容器内を温める。
- (2) ペットボトル内にお湯を抜いて、蓋をして密栓する。
- (3) ペットボトル内の温度が下がると減圧になるのでペットボトルがつぶれる。
- (4) 蓋を開けて空気を入れると変形しているが元に戻る。

### 2.7.7 ゆで卵による圧力バランスの実験

#### 使用器具

口の丸いガラス瓶 ( $\phi$  20 mm 程度)、紙片、ライター、ゆで卵 (殻をとったもの)、細いストロー

#### 実験

- (1) 口の丸いガラス瓶に紙片を入れ、点火する。
- (2) 点火後ただちにゆで卵で蓋をする。
- (3) 紙片が燃えきって、中の空気の温度が下がると、空気の体積減少により減圧になり、ゆで卵がガラス瓶の中に吸い込まれる。
- (4) ゆで卵を取り出すには、ガラス瓶を逆さにし、細いストローをゆで卵とガラス瓶の間に入れてストローから空気を吹き込む。ゆで卵の出し入れがガラス瓶内と大気圧の差で起こることから大気圧の圧力が理解できる。

## 2.8 真空バズーカ

#### 使用器具

1 m 以上の塩ビパイプ (出来れば透明、ピン球を使うときは内径 50 mm 以上、テニスボールでは内径 70 mm

以上)、ラップ、輪ゴム、グリース、ピン球、硬式テニスボール、真空ポンプ、真空ゴム管、バーベキュー等の金櫛、圧力計

## 実験

- (1) 図9のように、塩ビパイプに穿孔し、真空ゴム管を通して真空ポンプに接続するパイプ用を溶接する。塩ビパイプの両側は目の細かいエメリーペーパーなどで滑らかにする。
- (2) 塩ビパイプにピン球（テニスボール）を入れ、両端にグリースをぬり、ラップでカバーし、ラップが外れないように輪ゴムできっちり固定する。
- (3) 真空引きパイプに圧力計を取り付けた真空ゴム管を接続した後、ゆっくり真空にする。
- (4) 真空度が上がるにしたがってラップが塩ビパイプ側に凹むので、バーベキュー金櫛等でラップを突き刺す。
- (5) ラップが破碎し、大気圧と塩ビパイプ内の圧力差で音と共に外気が急激に塩ビパイプ内に充填し、その空気の流れてピン球（テニスボール）が飛び出す。塩ビパイプの先にアルミ缶などを置いておくと、大きく変形して飛び散ったり、穴があくことがある。特に、テニスボールを使用する場合は塩ビパイプの前には人がいないことや壊れると問題があるようなものは置いていないことを確認する。

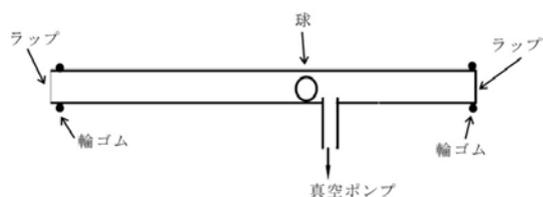


図 9: 真空バズーカー

## 実験

- (1) ステンレスボールの中心に穿孔し、アイボルトで固定して図10左のようなマグデブルグ半球を2個作成する。
- (2) ステンレスボールの淵にゴムシート（なければ厚めの紙を濡らせたもの）で作ったパッキングを取り付ける。
- (3) ステンレスボールにエタノールで濡らせた脱脂綿を入れ、点火する。
- (4) 点火後2個目のステンレスボールをかぶせる。中の酸素がなくなると消火する。ステンレスボールは熱くなるので注意する。
- (5) ステンレスボールを濡れた雑巾などで冷やす。
- (6) アイボルトにロープを付け、先ず1人でロープを引っ張ってはがれるかどうかを確認する。
- (7) 2つのアイボルトにロープを通し、ボールが外れても怪我などが無いように準備する。
- (8) 2人、4人、8人、16人とロープを引っ張る人数を増やしてボール内が減圧になり大気圧との差でステンレスボールが外れないことを確認する。
- (9) 大気圧と内部の圧力の差を計算する。ここでは空気中の酸素の燃焼による20%の体積減少よりも温度差による体積減少が大きい。

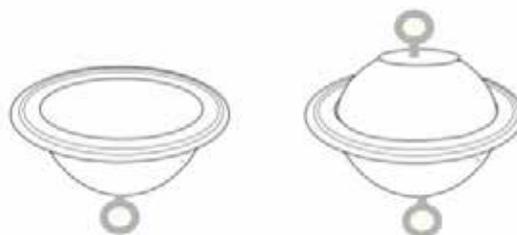


図 10: マグデブルグの実験

## 2.9 マグデブルグの実験

### 2.9.1 アルコール燃焼法

#### 使用器具

φ10-30 cm ステンレスボール 2 個、アイボルト 2 個、ゴムシート（なければ厚めの紙）、ロープ、エタノール、脱脂綿、ライター

### 2.9.2 真空ポンプ法

#### 使用器具

φ10-30 cm 金属製の半球 2 個、アイボルト 2 個、ゴムシート、ロープ、真空ポンプ、圧力計、真空コック、真空ホース

## 実験

- (1) 金属製の半球にアイボルトと真空コックを取り付ける。
- (2) ゴムシートで2つの半球の密閉度を確保する。
- (3) 圧力計を付けた真空ホースを真空ポンプにつないで吸引し、真空度を確認する。
- (4) 2つのアイボルトにロープを通し、ボールが外れても怪我などが無いように準備する。
- (5) 2人、4人、8人、16人とロープを引っ張る人数を増やしてボール内が減圧になり大気圧との差でボールが外れないことを確認する。
- (6) マグデブルグの半球の内圧と、半球を引っ張ることによりはずれる半球内圧の関係を理解する。

## 2.10 ストローでジャガイモに穴あけ

### 使用器具

ジャガイモ、ストロー（蛇腹のついていないもの）

### 実験

- (1) ジャガイモにストローを押し付けるとストローが曲がって挿入できない。
- (2) ストローの片方を指で押え、空気が出ないようにしてジャガイモに押し付けると、ストローがジャガイモに挿入される。

## 2.11 割りばし折り

### 使用器具

割りばし、新聞紙

### 実験

- (1) 割りばしを机の淵などに1/3程出して置く。
- (2) そのまま何もせず割りばしを叩いても割りばしは折れない。
- (3) (1)の状態の割りばしに新聞紙を乗せ、割りばしとの間に隙間がないように押し付ける。
- (4) 割りばしを叩くと割りばしが折れる。

新聞紙には大気圧が掛かっている。割りばしの端を叩くことによって新聞紙と机の間に少しの隙間ができ、減圧となり大気圧との圧力差により割りばしにも大きな力がかかることによる。

## 2.12 瓶の底抜き

瓶の底抜き実験を見かけることがある。これはどのような原理でおこるのかを調べる。

### 使用器具

ガラス瓶、水、炭酸水、ゴムハンマー

### 実験

- (1) ガラス瓶に何も入れないで、瓶の口をゴムハンマーでたたく。
- (2) ガラス瓶に水を入れて、瓶の口をゴムハンマーでたたく。
- (3) ガラス瓶に水を入れて、手のひらで瓶の口をたたく。
- (4) 水を入れたガラス瓶に詮をして、瓶の口をゴムハンマーでたたく。
- (5) ガラス瓶に炭酸水を入れて、瓶の口をゴムハンマーでたたく。結果は、(2)、(3)、(4)の実験でガラス瓶の底が抜ける。

(3)の実験が良く実施されており、水にかかる圧力が瓶の底を割ると誤解されている。しかし、(4)の実験で瓶に詮をしていても瓶の底が抜けている。また、手のひらで叩こうが、ゴムハンマーで瓶の口を叩こうが、瓶の底が抜けている。高速度カメラでの撮影から、瓶の口を叩くことによってだるま落としと同様に慣性の法則が働き、瓶は移動するが水は移動しなく、瓶と液体の間に隙間が生じ、此处が真空となる。この真空の空間に高速で水が移動することによる大きいダイラタンシー（速度勾配が大きくなるほど粘性係数が大きくなること）が働き、強い力で瓶の底が抜ける。炭酸水を使った場合は、気体の液体への溶解度はヘンリーの法則で圧力が高いほど溶解度が大きく、減圧になることによって二酸化炭素が溶出し、多量の泡となって減圧度がさがり、密度の低い泡が瓶の口の方に溢れ出ることによって、瓶の底が抜けにくい。

## 2.13 ペットボトルで雲をつくる

### 使用器具

ペットボトル（炭酸飲料のものが良い）、水、線香

## 実験

- (1) 密閉し、中が完全に乾いたペットボトルを外から押ししたり、引いたりしても何も起こらない。
- (2) ペットボトルの中に僅かな水を入れ、ペットボトルの壁を濡らす。ついで線香の煙を入れ、密閉する。このペットボトルを外からゆっくり押して、内部を圧縮する。圧縮した後に急激にペットボトルを元の大きさに戻すと、ペットボトル内に雲ができる。
- (3) ペットボトルを外から急に押し引く。押すと雲が消え、引くと雲が生じる。ゆっくり押す時、内部の温度が変化しない等温圧縮が起こる。急に引く時、断熱膨張で内部の温度が下がり、線香から出来た煙が核となって露点以下でも液滴である雲が出来る。一方、急な圧縮では温度が上がり、液滴が溶解する。

ポアソンの法則 ( $pV^\gamma = \text{一定}$ ,  $\gamma = C_p/C_V$ ) で、定圧熱容量  $C_p$  と定容積熱容量  $C_V$  の比である  $\gamma = 1.4$  とすると、図 11 のようになる。断熱条件で体積を 10 倍に膨張させると  $-180^\circ\text{C}$  も冷却される。また 10 倍に圧縮すると  $454^\circ\text{C}$  も加熱される。ここでは、 $V_i$ 、 $V_f$ 、 $a$  はそれぞれ圧縮前後の体積およびその比を表す。

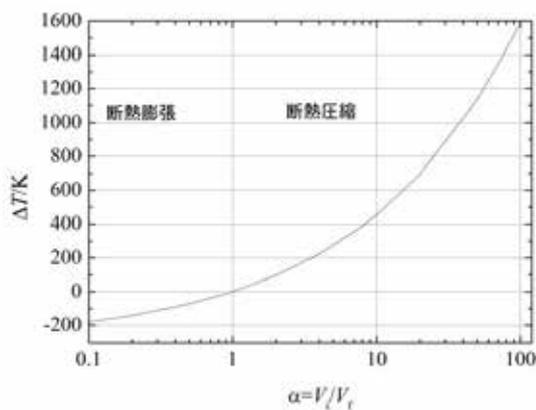


図 11: 断熱膨張・圧縮時の温度変化

### 2.14 空気着火

2.13 で示したように、断熱圧縮すると高温になる。例えば、手押しの自転車の空気入れなども空気の注入後ポンプのシリンダーを触ると温度が上がっている。

## 使用器具

図 12 のようなポンプ、エタノール、脱脂綿

## 実験

- (1) 図 12 のポンプシリンダーの底に僅かにエタノールを浸した脱脂綿を入れる。
- (2) エタノールの引火点および発火点はそれぞれ  $13^\circ\text{C}$ 、 $363^\circ\text{C}$  であるので、ポアソンの法則による計算値から、断熱条件で 8 倍以上に圧縮すると発火することを体験することができる。



図 12: 加圧発火機

## 3 実施した出張実験

2003 年に参加者数を数え始めてから図 13 に示すように、現在約 11 万人の方々に科学の面白さを楽しんでいただいた。

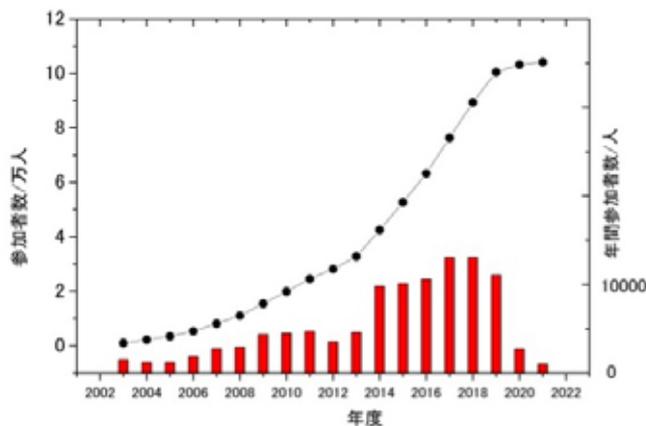


図 13: 体験実験・サイエンスショー参加者数推移:2020 年 3 月から 2022 年まで。2019 年から COVID-19 の感染予防のため大規模イベントが中止になり我々の体験実験への参加者が激減している。この期間は感染予防のため主にオンラインでの体験実験を実施した。

表 4: 2022 年アンケートの参加者 1211 名の結果

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
1 解答の割合 %	84.5	70.0	94.5	79.0	87.7	91.0	66.5	24.2
2 解答の割合 %	10.0	7.0	4.5	17.8	11.1	8.0	33.5	16.5
3 解答の割合 %	3.0	23.0	1.0	3.2	1.2	1.0	0.0	12.0
4 解答の割合 %	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3
5 解答の割合 %	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0
6 解答の割合 %								6.0
7 解答の割合 %								20.0

現在マスメディアによるバラティーター番組、Internet、YouTube によるサイエンスショーの記載や映像、CSR (Corporate Social Responsibility) の一環としての企業活動などが増えている。「面白がらせる」、「不思議がらせる」のみではなく、特徴ある科学現象について五感を使って実体験することにより感動が生まれる。ここから「なぜ?」、「どうして?」との知的好奇心が芽生え、身の回りの様々な自然現象を先人が解明してきた原理から応用まで体得できる機会を持つことができる。これは「知る喜び」、「学ぶ楽しさ」、「ワクワクする好奇心」に支えられる人間の能力を高める最大の原動力である。この人が本来持つ能力を呼び覚まし、自発的学習能力を養って頂くため、実施したプログラムを PDCA サイクルに乗せて改良し、科学体験実験を実施した。

圧力に関する実験は体験科学実験と所謂サイエンスショーの両方で実施している。体験実験では 40 人程度の参加者に図 14 に示したように多くのカウンセラーと共にファシリテートを中心に実施し、指導者の机間巡視を重要と考え、参加者の個々の進度や理解度に対応することに注力した。



図 14: 実験教室の指導体制図

サイエンスショーでは 1000 名程度まで参加者が超えることもある。そこでは、動画やイラストで原理や結果の活用例を多く示し、身の回りでの利便性が科学の基礎によって成り立っていることを示した。

## 4 参加者のアンケート

2020 年から 2023 年度コロナ禍で急激な罹患者の増加の問題もあったが、2022 年について十分な感染予防対策のもと対面での体験実験を実施した結果を以下に示した。参加者のアンケート結果は表 4 および図 15 に示した。

Q1: 2022 年度は同じ地域で 2 回実施したので若干通常の統計とは異なり、体験実験に過去参加された方は多いが、それでも 84.5 %が初めての体験実験であり、体験実験の実施が望まれる。5 回以上の体験実験参加経験者は 1 %であった。

Q2: その中でも特に 23 %の参加者が“理科嫌いであったが受講して理科好きになった”との解答であり、この体験実験の効果が認められる。また最高値は 45 %であり、過去の 40 年間の最高値であった。

Q3: “面白かった” 94.5 %、“どちらかと言えば面白かった” 4.5 %で、合計 99 %に楽しんで頂けた。

Q4: 主観ではあるが、“理解できた” 79.0 %、“どちらかと言えば理解できた” 17.8 %で、合計 96.7 %が理解できている。3.2 %が“どちらともいえない”ということなので更なる机間巡視と学習進度個別対応を検討している。

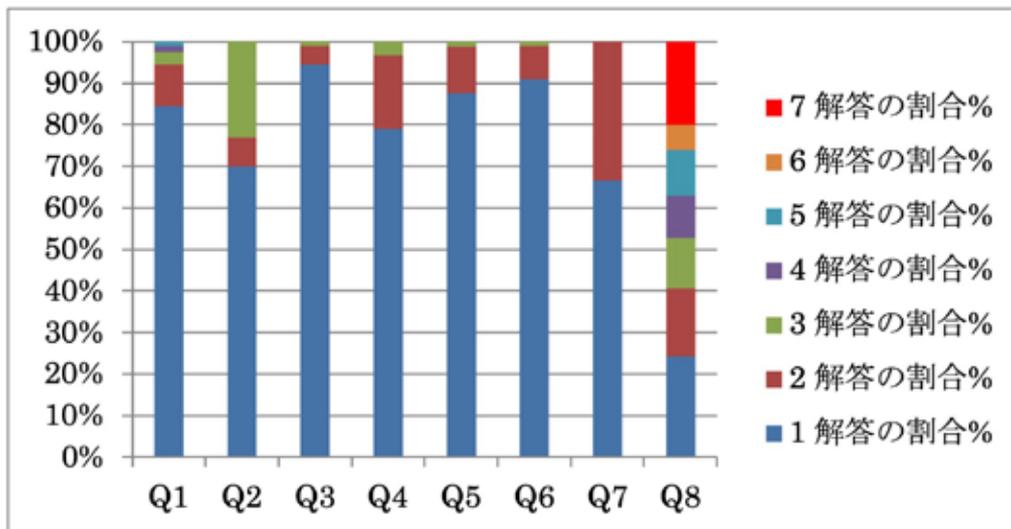


図 15: アンケート纏め：Q 1 から Q8 の割合： 解答 1, 青； 解答 2, 橙； 解答 3, 緑； 解答 4, 紫； 解答 5, 蒼； 解答 6, 橙； 解答 7, 赤

Q5: “理科に関心が増えた” 87.7% “どちらかといえば理科に関心が増えた” 11.1%、合計 98.8% に効果があった。

Q6: “また参加したい” 91.0%、”どちらかと言えばまた参加したい” 8%、合計 99% であった。但し Q3 の 1% と Q6 の 1% は同じ回答者ではなく、残念ながら相関を取れるものがなかった。

Q7: 男性 66.5%、女性 33.5%

Q8: 参加者の学年は進学を控えている 6 年生は少なく、1 年生が多いが、他はほぼ均等で、20% が付添いの保護者であった。

## 5 まとめ

圧力について実験後の感想は主として、

- 「そんなに大きな力がかかっていたのだ」
- 「そんなところに利用されているのだ」
- 「こんな簡単なもので実験できるのだ」

など、普段感じない大気圧の大きさを体感していただき、身の回りの科学を見直し、原理が活用されていることを理解する機会を持っていただけた。アンケートの自由記述では、

- 「いろいろすごい実験が出来て、中身を学べてすごく楽しかった」
- 「いろいろな難しいことを知れたし、将来役立つと思ったので良かった」
- 「いつもの授業よりもすごいことができてとてもうれしかったです。」
- 「初めて知れたことやおもしろいこと色々あったのでよかったです」
- 「なかなか体験できない事ができて、とてもたのしかったです。」
- 「知らない事をたくさん知れておもしろかった。」
- 「わかりやすく説明してくれたので、とても聞きやすくて良かったです」
- 「知らない事が知れて最高です！楽しかったです。」
- 「科学に興味を持つようになりました」
- 「すごいとても面白かった。」
- 「これから勉強する」

などの記載があった。通常の授業では出来ないことを体験し、数式による板書での説明のみではなく、アニメや動画（高速動画を含む）等を使った説明で、科学に対するユウレカモーメントにより、難しいという壁が崩れ、科学に興味を触発され、自発的学修意欲にスイッチを入れることを達成できたのではないかと考えている。

## 参考文献

- 1) H. Smith, Pamela, *The Business of Alchemy: science and culture in the Holy Roman Empire*. Princeton: Princeton University Press. (1994)
- 2) C. C. Gillispie,(1960). *The Edge of Objectivity: An Essay in the History of Scientific Ideas*, 100,(1960) Princeton University Press.
- 3) F. Zwicky, *Helvetica Physica Acta*, 6, 110-127(1933)
- 4) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 計量標準総合センター, 国際単位系 (SI) 基本単位の定義改定と計量標準 (2020) : 2019年5月20日, 大きな改定が実施された国際単位系 (SI) の解説
- 5) *Encyclopædia Britannica*, 11th Ed. 12, 670 (1910) Cambridge Univ. Press. E. H. Hall, J. Y. Bergen, A Textbook of Physics, 3rd Ed.,. 52 (1903) New York: Henry Holt & Co.
- 6) 日本化学界編, *化学便覧 基礎編 改訂 6 版* (2021) , 丸善出版 : <https://tpds.db.aist.go.jp/tpds-web/index.aspx>
- 7) 国立天文台編, “理科年表 平成 29 年 第 90 冊” , 丸善出版 (2016)
- 8) J. H. レック 著, 富永五郎, 織田善次郎 共訳 *真空度測定法 産業図書* (1967) : K. Jousten, *Handbook of Vacuum Technology* ,WILEY-VCH Weinheim, (2008): 日本高圧力技術協会, *圧力技術の現状と将来* (1989)
- 9) 厚生労働省, *身体状況調査の結果* <https://www.mhlw.go.jp/content/000711007.pdf>
- 10) 日本靴医学会, *靴の科学* (2006) , 杏林舎
- 11) 伊東章, *化学工業*, 73, 669 (2009)

# 付録

## アンケート：2022年度 体験実験受講者アンケート

### アンケート〈めざまし科学実験マイスター〉

2022

- Q1 今回のような体験講座を受けるのは、何回目ですか？  
1回目 2回目 3回目 4回目 5回目以上
- Q2 今回受講して、理科についてどのように思うようになりましたか？  
① 受ける前も好きだったが、受けた後はもっと好きになった  
② 受ける前も好きだったし、受けた後もあまり変わらない  
③ 受ける前は好きではなかったが、受けた後は好きになった  
④ 受ける前も好きではなかったし、受けた後もあまり変わらない  
⑤ その他 ( )
- Q3 面白かったですか？  
① 面白かった  
② どちらかといえば面白かった  
③ どちらともいえない  
④ どちらかといえば面白くなかった  
⑤ 面白くなかった
- Q4 自分なりに理解できましたか？  
① 理解できた  
② どちらかといえば理解できた  
③ どちらともいえない  
④ どちらかといえば理解できなかった  
⑤ 理解できなかった
- Q5 今回の参加をきっかけに、理科に対する興味・関心が増えましたか？  
① ふえた  
② どちらかといえばふえた  
③ どちらともいえない  
④ どちらかといえばふえなかった  
⑤ ふえなかった
- Q6 今後、今回のような体験講座があったら、また参加したいと思いますか？  
① 参加したい  
② どちらかといえば参加したい  
③ どちらともいえない  
④ どちらかといえば参加したくない  
⑤ 参加したくない
- Q7 あなたの性別を教えてください。  
① 男性 ②女性
- Q8 何年生ですか  
① 6年生、② 5年生、③ 4年生、④ 3年生、⑤ 2年生、⑥1年生 ⑦左以外
- Q9 今日一番おもしろかったのはどの実験ですか

Q10 感想

ご協力ありがとうございました。いただいたアンケートは今後の活動の参考にさせていただきます。