

3. 気体の状態を表現する四大物理量

2章までは、物質の三態のすべての状態を扱ってきた。しかし、ここからは、主に“**気体**”についてのみ扱うことにする。もちろん、固体や液体にもいろいろな性質があって興味深いのであるが、なんといっても、**フィーバー状態の分子が飛び交う気体の状態は、温度による体積などの物理的変化が大きいのだ。**

この気体の大きな物理的変化を何かに利用できないかと考えたのは、紀元前～紀元 1 世紀頃（←推定）の古代アレクサンドリアの工学者・数学者であったギリシア人の**ヘロン**にはじまる。その後、いろいろな蒸気機関が発明される。

1712 年には、イギリスの**ニューコメン** (Thomas Newcomen) によって、鉱山の排水用として実用的な蒸気機関 (**大気圧機関**) が製作された。その後、同じくイギリスの**ワット** (James Watt) によって改良され、1769 年に新方式の蒸気機関が発明されていくのである。1804 年には、これまたイギリスの**トレビシック** (Richard Trevithick) が**蒸気機関車**を発明した。1825 年になると、“イギリス鉄道の父”として有名な**スティーブソン** (George Stephenson) が**営業用の蒸気機関車**を開発。世間ではスティーブソンが蒸気機関車の発明をしたと誤解されている場合が多いが、発明したのはトレビシックである。そしてその後も人類は上手に気体の物理的変化を利用してきているのである。

気体の状態を物理的に表現するための四大物理量

気体の状態を正確に表現するためにはどのようにしたらよいのだろうか。水の

3. 気体の状態を表現する四大物理量

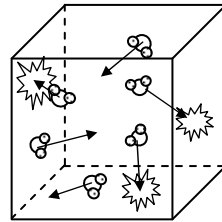
気体である“水蒸気”を具体的に取り上げて、考えていくことにしよう。

水蒸気といえば、その温度は？・・・そう、少なくとも $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上だ。とても温度が高い。言い換えると、とてもエネルギーが大きい。では、このとき水蒸気の状態はどうなっているのか？ 1章で確認しているように、水分子園児たち（水蒸気の気体分子）は、フィーバー状態でデタラメな方向へ飛び回っている。さて、ここで、この気体分子の状態をよく調べたいので、閉じ込めてしまおう！

閉じ込めるためには、閉じ込める容器が必要となる。つまり、気体はその容器内に収まることになる。これが、**気体の体積 V [m^3]**

(volume) となる。

また、激しく飛び回っている気体分子は、容器の壁にも図 3-1 のように、次々と連続的にぶつかるに違いない。いくら、それぞれの気体分子が小さくても、連続的に衝突を繰り返せば、容器の壁へいくらかの影響を与える。これが、**気体の圧力 p [Pa]** (pressure) となる。



閉じ込められた気体分子

図 3-1

閉じ込めた気体分子はどれだけの個数であるかも、気体の状態を知る上では大切な情報である。つまり、**気体分子の個数 n [mol]** (number) の情報が必要なわけだ。無論、一つ一つ気体分子の数を数えてもよいが、実際不可能に近いので、通常は気体の体積から気体分子の個数を求める。有名な**アボガドロの法則** (Avogadro's law) である。

アボガドロの法則 (Avogadro's law)

1811 年に、イタリアのアヴォガドロ (Amedeo Avogadro) が仮説として提唱した、同温、同圧、同体積の気体は、どんな気体であっても同数の分子を含むという法則。覚えておかねばならないのは次の場合のみ。

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 1 気圧 ($=1.013\times 10^5\text{ [Pa]}$) の状態で、気体の体積が 22.4 [L] ($=22.4\times 10^{-3}\text{ [m}^3\text{]}$) ならば、その気体の分子数は 1 [mol] ($=6.02\times 10^{23}\text{ [個]}$) である。

ここで登場した [mol] (モル) という個数の単位は、気体の分子数を表す場合に便利なのでよく用いられる。物質質量という。気体分子数¹があまりに多いので、 6.02×10^{23} [個] をセットにして 1 [mol] と定めたのだ。まあ、鉛筆などの本数で、12 [個] をセットにして 1 [ダース] というのと同じだと思えばよい。

また、この 6.02×10^{23} [個/mol] のことを特にアボガドロ数 (Avogadro's number) という。これは、同温、同圧、同体積の気体は同数の分子を含むというアヴォガドロの仮説から導かれた基礎定数である。この本では、 N_A とかく場合もあるので、ここで押さえておいてほしい。つまり、

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ [個/mol]}$$

である。ただ、1969 年の IUPAC (国際純正・応用化学連合: International Union of Pure and Applied Chemistry) 総会で“アボガドロ定数”に名称が変更されたので、現在はアボガドロ定数 (Avogadro constant) と呼ぶほうが正しいようだ。また、定義は質量数 12 の炭素 ^{12}C の 12 [g] 中に含まれる炭素原子の数であり、1986 年以降は、 $N_A = 6.0221367 (\pm 0.0000036) \times 10^{23} \text{ [mol}^{-1}\text{]}$ である。ちなみに、単位の $[\text{mol}^{-1}]$ は、[個/mol] を正しく書いた表記方法である。

さて、閉じ込めた気体の情報としてもうひとつ必要なものがある。それは、気体の温度 T [K] (temperature) だ。気体分子のフィーバー状態のエネルギーの大きさを示しているからだ。温度の単位は、絶対温度の“ケルビン”である。

以上、気体の圧力 p [Pa]、気体の体積 V [m^3]、気体分子の個数 n [mol]、そして、気体の温度 T [K] の 4 つが、“気体の状態を物理的に表現するための四大物理量” (←聖史造語) である。気体を扱おうとするときは、これらの四大物理量をいつでも確認することが、気体状態の理解の早道となるのだ。

気体の状態を物理的に表現するための四大物理量 (←聖史造語)

- ① 気体の圧力 p [Pa]
- ② 気体の体積 V [m^3]
- ③ 気体分子の個数 (物質質量) n [mol]
- ④ 気体の温度 T [K]

圧力

少し脱線して圧力についてしっかりと説明しておくことにしよう。なぜなら、**圧力**というものを誤解している人があまりに多いからである。というのも、**圧力**という名前がついているので、圧力は力の一種のような錯覚を受けるのだが、

圧力は力ではない

のである。

え？ そうなの？ と思ってしまった人、・・・しばらくお付き合い願おう。**力学編**で登場した、垂直抗力や摩擦力のように、“□□力”という形の圧力であるが、**力ではない**。しかし、**力と密接にかかわる物理量であることには変わりない**。

それでは、片方を削った鉛筆を用意してほしい。**実際に体験しながら圧力と力の関係を理解していくことにしよう**。準備はよいだろうか。では、この鉛筆を人差し指の上に立ててみよう。図 3-2 のように、削っていないほうを下にして立てる方法と、削ったほうを下にして立てる方法がある。両方を自分でやってみてほしい。

さて、両者に何か違いがあっただろうか？ 用いている鉛筆は同じなのに、**人差し指への感じ方が大きく異なるの**

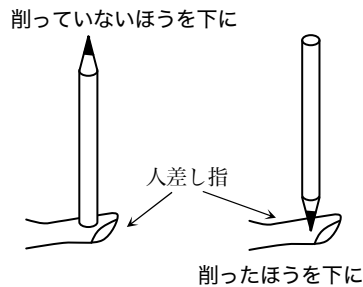


図 3-2

ではないだろうか？ この**人差し指への感じ方がまさに圧力**なのである！

再度整理してみよう。図 3-2 で用いた鉛筆は同じものだから、その質量は同じはずである。たとえば m [kg] としよう。重力加速度の大きさも $g=9.8$ [m/s²] で同じなので、鉛筆にはたらく重力も同じ mg [N] だ。・・・にもかかわらず、鉛筆の削ってないほうを下にして立てた場合に比べて、削ったほうを下にして立てると、かなり人差し指が痛い。同じ重力を支えて静止させているはずなので、力のつりあいを考えてみても、人差し指が与えている力の大きさは共に mg [N] のはずなのに、削ったほうを下にして立てると痛く感じるのはなんだか妙な話で

あるとは思わないか？

このように、同じ力の大きさであるにもかかわらず、感じ方が異なるのはなぜだろうか？・・・どうだろうか？もう一度自分で実験して何か気がつくことはないだろうか？ そうだ、よく見るとすぐわかる。**鉛筆と人差し指との接触面積が異なるのである！**

つまり、**接触面積を考慮した力の感じ方を表現するような物理量が“圧力”** (pressure) であり、1 [m²] あたりにはたらく力の大きさ [N] を圧力というのである。圧力を表す文字は p または P を用い、単位は定義どおりなら [N/m²] となるのだが、これを [Pa] (パスカル) という単位で表現する。つまり、[Pa] = [N/m²] である。

圧力 (pressure)

単位面積あたりにはたらく力の大きさのこと。単位は [Pa] (パスカル:pascal)。

[注意点]

1. 圧力は力ではない
2. 力ではないので力の矢印で表現してはいけない

さて、[注意点] の2. をよく見てほしい。圧力は“力の矢印で表現してはいけない”とある。では、どのように表現したらよいのか。実は、**圧力の正しい表現方法はない**のだ。一般的には、直感的にわかりやすいように、図 3-3 のように、圧力のかかる面を先端とする矢印を用いて表現する場合が多い。なぜなら、矢印の向きで圧力のかかる向きがわかり、矢印の長さで圧力の大きさが表せるからであろう。たしかに、図 3-3 のような表現がされていると上から板の表面に圧力がかかっているように見える。しかし、繰り返すがこの表現方法は必ずしも正しくはない。矢印の本数は実はまったく意味がないし、矢印と矢印の間にも当然圧力がかかっているわけで、そういった正確さにもかける表現であ

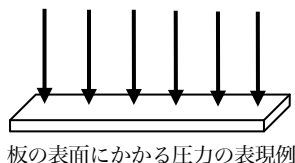


図 3-3

る。・・・とはいえ、直感的にはわかりやすいので、この本でもこの表現方法を採用することにしよう。

パスカルの原理

ところで、圧力の単位は $[\text{N/m}^2]$ でも不自由しなさそうなのに、なぜ $[\text{Pa}]$ という単位を用いるのであろうか。それは、 $[\text{Pa}]$ が**国際単位系 (SI 単位系) の“圧力の単位”**であるからだ。

この単位は、フランスの哲学者、数学者、物理学者である**ブレーズ・パスカル** (Blaise Pascal) の名前よりきている。このパスカルという人はいろいろな業績を残しているので紹介しよう。1623 年生まれで、16 歳のとき、円錐曲線に関する定理である“**パスカルの定理**” (円錐曲線論試論：1640 年) を発見。1642 年には**歯車式計算機** (Pascaline または Arithmetique) という、歯車の組み合わせにより、機械で計算ができる計算機を世界で 2 番目に発明している。その後、圧力について研究をはじめ“**パスカルの原理**” (後述) を発見。数学上では**確率論の創始者**および**微積分学の先駆者**の 1 人であり、1654 年に**数学的帰納法**を定式化した。二項定理で登場する“**パスカルの三角形**”の“パスカル”は、このパスカルの名前であるが、それ以前から多くの数学者によって研究されていたようだ。

31 歳のとき宗教的回心を経験してヤンセン教徒となり、ポールロワイヤル修道院に入る。その宗教的な考えは彼の死後“**パンセ (Pensées)**” (1670 年) として出版された。パンセとはフランス語で瞑想録のこと。この中に、「人間は考える葦である。」や、「**クレオパトラの鼻**。それがもう少し低かったなら、大地の全表面は変わっていただろう。」という有名な言葉が残されている。また、パスカルは 1662 年、世界で初めて公共交通機関としての乗合馬車をパリで創業した。しかし、その半年後にこの世を去っている。

それでは、圧力に関するパスカルの業績である“**パスカルの原理**”を紹介しよう。たとえば、図 3-4 をみてほしい。パスカルの原理の説明によく利用される装

置である。容器の中には液体が入っている。
 右側の細い管の上におもり（図では分銅型）をひとつ乗せ、同じ水位になるように左の太い管の上におもりを乗せると、多くのおもりが必要になるというものだ。同じ水位になるということは、太い管のほうの

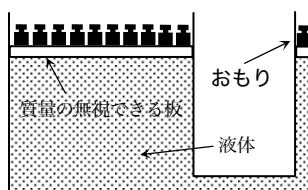


図 3-4

液面への圧力と、細い管の液面への圧力が等しくなる場合である。

これのどこが“パスカルの原理”なのかを順に説明していこう。

まずは、右の細い管の上におもりを乗せるとは、物理学的にはどういうことか

を考えてみたい。図 3-5 を見ていただこう。おもりの質量が m のとき、おもりの重力 mg 分の力が、細い管側の液体に与え

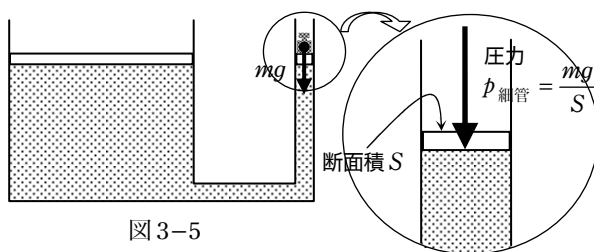


図 3-5

られることになる。ここで、細い管の断面積が S だったとすると、右側のおもりひとつが液体にける圧力 $p_{\text{細管}}$ は、圧力が単位面積あたりにはたらく力の大きさであったので、 $p_{\text{細管}} = \frac{mg}{S}$ となる。

さて、同様に左側の太い管のほうでも圧力を考えてみよう。太い管のほうには、10 個のおもりが乗っている。それぞれのおもりが mg の力を与えるので、図 3-6 のよう

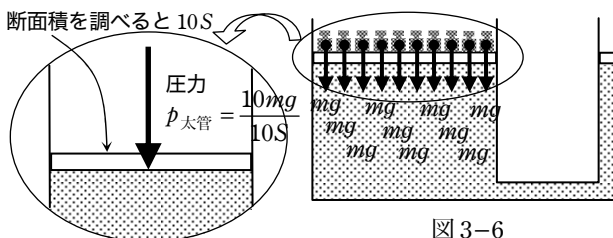


図 3-6

に、全体では $10mg$ の力を液体に与えることになる。ちょうど 10 個おもりを乗せると液面が同じになる場合、太い管の断面積を調べてみると、 $10S$ になっている

3. 気体の状態を表現する四大物理量

ことがわかる。左側のおもり 10 個が液体にかかる圧力 $p_{\text{太管}}$ は、

$$p_{\text{太管}} = \frac{10mg}{10S} = \frac{mg}{S} = p_{\text{細管}}$$

となる。

つまり、図 3-4 の状態は、細い管のほうも、太い管のほうも、同じ大きさの圧力がかかっているから、液面が同じ高さになっているということがわかったわけだ！

再度、右側の細い管のほうのおもりについて考えてみよう。図 3-5 でみたように、おもりは液体に $p_{\text{細管}}$ の圧力をかけるのだが、液体はそのかけられた圧力をどうしているのか？ 身近な例では、コップに入ったジュースをストローで飲む場合を想像してみるとわかるだろう。飲むのではなく、ストローを吹くとうなるだろうか？ ストローの中に入っていたジュースが逆流し、コップの液面がわずかに上昇するはずだ。この装置の場合も同様で、おもりによってかけられた圧力は、液体を介して伝わっているのである。そして、図 3-7 のように、太い管のほうに伝わった圧力 $p_{\text{細管}}$ と同じ大きさになるように 10 個のおもりを用いて上から圧力 $p_{\text{太管}} (=p_{\text{細管}})$ をかけてやれば、圧力がつりあった状態になり、液面を同じ高さにすることができるのである。このように、液体の一部分に圧力 p を

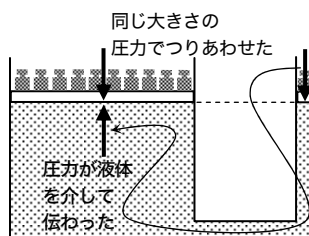


図 3-7

かけると、その液体のどの部分にも同じ大きさの圧力 p がかかるというのが、1653 年にパスカルが発見したパスカルの原理 (Pascal's principle) なのである。

パスカルの原理 (Pascal's principle) 1653 年

密閉した容器の中で静止している流体内の 1 点の圧力がある大きさだけ増やすと、流体内のすべての点の圧力は同じだけ増える。

〔注〕流体 (fluid) とは、液体と気体の総称であるから、この原理は気体の場合でも成立することに注意。

図3-7では、細い管にかかった圧力が、太い管の管口方向にだけ伝わるようなかき方をしているのだが、実際には図3-8のように、液体のあらゆる部分に圧力が伝わるのである。また、たとえば図に示したように、液体中に箱を入れた場合は、その箱にも同じ大きさの圧力がかかるのである。無論、気体であっても同じことがいえる。

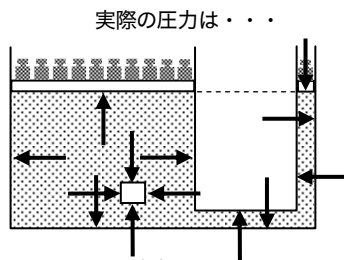


図3-8

さてこの説明用の装置をよく見ると気がつくと思うが、この装置は、細い管のほうにたったひとつのおもりを乗せるだけで、もう片方の太い管側に、力にすると10倍の大きさの力を与えることができる装置なのである。つまり、小さな力で大きなものを動かすことが可能なのだ。よって、この装置は、自動車などのブレーキ装置や、油圧式ジャッキに応用されている。ただ、力では得をするが距離では損をするという、力学編の8章“仕事”のところで、てこを用いて説明した仕事の原理があるため、多くの力に増幅したければしたいほど、少ない力ではたくさんの距離を移動させなくてはならない。

圧力の単位

すでに述べたように、SI単位系では圧力の単位として [Pa] (パスカル) を用いる。しかし、他にも一般的によく使用される圧力の単位があるので、ここで紹介しておこう。ただし、熱力学および物理学では、基本的に圧力の単位としては [Pa] を用いるので、他の単位で表現された場合は、単位変換を行うこととなる。

気圧 [atm]

まずはよく利用される“気圧 (atmospheric pressure)”という単位だ。「われわれの生活している地表の大気圧は1気圧である。」というように、きつとどこかで耳にしたことがあるだろう。この単位を記号でかくと [atm] となる。

$$1 \text{ 気圧} \rightarrow 1 \text{ [atm]}$$

ちなみに，[atm] の読み方は“アトム”だ。だから，1 [atm] とかいて“いちアトム”と読むことになる。地表の大気圧が1 [atm] なので，よく利用される圧力の単位である。ちなみに，1 [atm] は標準気圧（standard atmospheric pressure）と呼ばれる。

せっかく大気圧の話が出たので，大気圧とは何かについて説明しておくことにしよう。大気圧とは文字通り“大気の圧力”である。ご存知のとおり，地球の表面には，薄いではあるが大気の層がある。地表にいる人の立場で考えると，図 3-9 のように，常にその大気の層を自分の上に乗せている状態になっている。大気には当然質量があるので，地球から万有引力を受ける。言い方を変えれば，大気には重さがある。つまり，地表にいる人は，頭の上の空気層の分の重さを 24 時間，365 日，片時も休むことなく支え続けていることになるわけだ。この空気の重さこそが大気圧の正体なのだ。それが，地表だと 1 [atm] と表現される。だから，

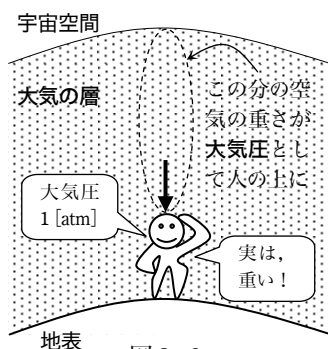


図 3-9

より高いところへ行けばそれだけ自分の頭の上の空気層が少なくなるため，気圧が下がる。上昇していけば，どんどん気圧が下がり，最終的に宇宙空間に出たら，もう頭の上に空気の層がないので 0 [atm] となるわけだ。

また，図 3-9 では，頭の上からだけ大気圧がかかるような図になっているが，すでに述べたように，気体も流体なので，パスカルの原理があてはまる。つまり，地表の人は，体に接触している大気のあらゆる方向から，等しく 1 [atm] の大気圧を受けている点だけを誤解しないように付け加えておこう。

また，1 [atm] = 1.01325×10^5 [Pa] である。気象情報では，低気圧，高気圧，さらには台風の中心気圧を，“ヘクトパスカル”という単位を用いて表現しているが，“ヘクト”とは，SI 接頭辞の一つで，“ $\times 10^2$ ”の意味である。だから，

$$1 \text{ [atm]} = 1.013 \times 10^5 \text{ [Pa]} = 1013 \text{ [hPa]} = 1013 \text{ [mbar]}$$

となる。通常は有効数字 4 桁で気象情報などでは用いられる場合が多いので，せ

つかくなので、物理学では例外的であるが、有効数字 4 桁で覚えておくことをオススメする。

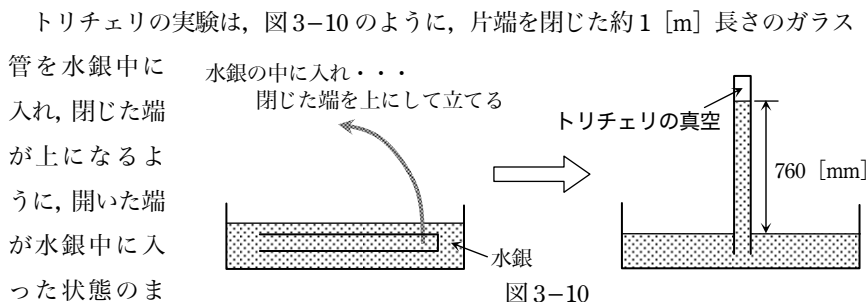
また、気象情報では以前は [mbar] (ミリバール) という単位を用いていた。

$$1 \text{ [mbar]} = 10^2 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [hPa]}$$

まったく同じ数字で単位だけ SI 単位系の [Pa] へと移行が簡単にできた数少ない例である。・・・が、数値を維持しようとしたため、ほとんど用いない“ヘクト(h)”などという SI 接頭辞が用いられるハメにはなってしまった。

水銀柱ミリメートル [mmHg]

他にも、歴史的にどうしてもはずせない圧力の単位があるので、もうひとつだけ紹介しておこう。それは、[mmHg] (水銀柱ミリメートル or ミリ水銀 or ミリエイチジー) という圧力の単位である。これは、ガリレオ・ガリレイの弟子であったトリチェリ (Evangelista Torricelli) が、1643 年に行なった次のような実験に関連した単位であるからだ。



ま立ると、ガラス管内の水銀がいつでも一定の高さ (←760 [mm]) になるというものである。

これはなぜかという点、図 3-11 で示したように、大気圧 1 [atm] と、760 [mm] の水銀柱が加える圧力が、ちょうど同じ大きさとなってつりあうからである。言い換えると、大気圧によってガラス管の中に水銀が押し上げられるが、760 [mm] の高さまで押し上げたところで、水銀柱の重さが生み出す圧力が、大気圧と等しくなるため、それ以上水銀を押し上げられないのだ。

3. 気体の状態を表現する四大物理量

つまり、

$$1 \text{ [atm]} = 760 \text{ [mmHg]}$$

となる。また、[mmHg]（水銀柱ミリメートル）の単位を、トリチェリの名前にちなんで [Torr]（トル or トール）ともいう。つまり、

$$1 \text{ [mmHg]} = 1 \text{ [Torr]}$$

すでに述べたように、国際単位系（SI 単位

系）においては、圧力の単位は [Pa] を用いることになっている。しかし、日本の計量法においては、血圧の計量に限って [mmHg] を、生体内の圧力の計量に限っては [Torr] が用いられる。また、真空工学の分野などでは、真空の度合いを調べる場合にも、圧力の単位として [Torr] が、いまだに用いられている。

ここで再度、図 3-10 をみてほしい。トリチェリはこの実験で、水銀柱が 760 [mm] の高さで一定となることと同時に、ガラス管内の水銀柱の上の部分には、何もない“真空 (vacuum)”ができることを発見している。これを“トリチェリの真空 (Torricellian vacuum)”という。

ちなみに、水銀の代わりに水を用いてこの実験を行うと、水柱の高さは約 10 [m] で大気圧の 1 [atm] とつりあう。これは、地表から 10 [m] 以上の深さの井戸から直接水をくみ上げることができないといった日常の経験から、トリチェリの時代より前から知られていたようである。水銀と水では大きくその柱の高さが異なるのは、水と水銀の密度の比（水：水銀 $\cong$ 1：14）によるものである。

