

英語と日本語で学ぶ

熱力学



Ruggero Micheletto [著]
戸坂 亜希

Thermodynamics in English and Japanese

共立出版

英語と日本語で学ぶ 熱力学



Ruggero Micheletto [著]
戸坂 亜希

共立出版

Message from Author

The idea of this book was born in 2011 because of the necessity of a proper “Thermodynamics” text book for the students in the Material Sciences Faculty in Yokohama City University, Japan. This university is highly internationalized and has a number of foreigner teachers that teach sciences courses in English.

Japanese and foreigner exchange students follow classes, but since majority of them are Japanese we matured the idea of the necessity of an appropriate text book in both languages. We contacted the Editor and the reaction was enthusiastic.

The “Thermodynamics” course is given by one of the authors in the autumn semester and lasts about 22 hours (15 classes of 90 minutes). It gives the fundamental of thermodynamics, demonstrates from scratch the ideal gas law, the kinetic theory and Boltzmann principles, teaches what is Brownian motions, its central laws and implications, goes through phenomena like thermal drift and thermal noise, explains key concepts like the thermodynamics fundamental laws, thermodynamical machines and entropy and even touches electrical phenomena and demonstrate the Ohm law.

The class finishes where quantum mechanics begins. At the end of the course the last lectures introduce the limitations of thermodynamics, explain and derive step by step the very first quantum mechanical equation: the Planck “Black Body” radiation formula.

Thermodynamics can be a rather cold and sometimes boring subject. So we focused to keep reader alert and motivated. In this book we never give concepts from above, but incite students to understand the fundamental

meaning of things in the real world. We try always to give reasons why those concepts were developed and explain what practical problems a theory solves.

For example, the ideal gas law, usually given as a starting proposition in many textbooks, it is instead derived gradually here from basic concepts of first-year physics. Or, as another example of our approach, after introducing and deriving Boltzmann distribution, we apply it to a column of air and show how it explains everyday life problems like diminished pressure with height or the weaker concentration of oxygen at higher elevations.

At the end of this course students are satisfied from the feeling that they really understood the physical meaning of each formula learned. Instead of forcing students to just learn and memorize abstract things in order to pass an exam, we focused on transmitting the essence of the meaning of things, and give the students the ability of deriving their own physical model so they feel they are really in control of physical concepts.

We hope this book will transmit the same feeling as our course. Yokohama City University score each year in the top 10% as student satisfaction and top 1% in students employment-ratio in Japan, surpassing several Japanese world class universities.

Ruggero Micheletto, PhD in Physics
Yokohama, July 2015

著者からのメッセージ

皆さんは英語は得意ですか？ 英語はあまり得意じゃない，という理科系の学生は少なくありません．ところが，実は，理科系でも研究室に入ると，もれなく英語の論文を読むという輪講やゼミが待ち構えています．ひょっとすると，「ただでさえ英語が苦手なのに，難しい研究の話を英語で読むなんて…」と思うかもしれません．あるいは，「英語は得意だけど，物理の話を英語で読むのは敷居が高そうだ」と思う人もいるかもしれません．

この本は，そんな皆さんのために書きました．

いろいろな使い方ができるように，工夫しました．例えば，右のページの日本語のところだけを読むと，熱力学の本になっています．具体的な例を使って，なるべくわかりやすく説明しています．英語が苦手な人は，初めは右のページだけ読んでもよいでしょう．左のページには，右ページとまったく同じ内容が英語で書かれています．英語が苦手だな…と思っている人も，日本語で内容を理解できたのなら，きっと英語でも理解できると思います．

科学の世界で使われる英語は，実はそんなに難しくありません．なぜなら，科学の世界では論理を明確に伝える必要があるために，比喩や暗喩，難しい熟語などがあまり使われないからです．ごく簡単な文法だけで，科学の英語を読むことはできるのです．

ただし，普通の英語の教科書には出てこない，いわゆる科学用語やしきたりといったものは覚えなくてははいけません．英語のページには，私がかつて学生だったころに，間違ったことや疑問に思ったことを脚注で解説しました．単に英語のことだけではなく，物理の世界で用いられるしきたりについても書きました．

科学の世界の英語って、ちょっとした専門用語を覚えたらそんなに難しくな
いんだ！ と皆さんが自信をもつことで、新しい世界がひらけますように.

2015 年 7 月

戸坂亜希

Contents

Chapter 1 Basics for thermodynamics	2
1.1 Introduction	2
1.2 First experiments with gases	4
1.3 The law of ideal gases	10
1.4 Isothermal compression/expansion	20
1.5 Adiabatic compression/expansion	22
 Chapter 2 A mathematical exercise	 30
2.1 The physical meaning of differentials	30
2.2 How to obtain the circumference of a circle?	34
2.3 The area of a sphere	36
 Chapter 3 Laws of thermodynamics	 42
3.1 What is thermodynamics?	42
3.2 First law: the heat engine	42
3.3 The second law: order and disorder	44
3.4 Entropy	48
 Chapter 4 Distributions	 56
4.1 What is a “distribution”?	56
4.2 The distribution density in an air column	56
4.3 The Boltzmann law	66
4.4 The concept of distribution of a general potential	74

Chapter 5	Various phenomena explained by thermodynamics	...	86
5.1	Physical states: gas, liquid and solids	.....	86
5.2	Speed distribution in an ideal gas	.....	92
5.3	Brownian motion	.....	98
5.4	Thermal noise	.....	110
5.5	Evaporation	.....	116
Chapter 6	Applications	.....	130
6.1	Diffusion process	.....	130
6.2	The drift velocity	.....	138
6.3	Electric resistance	.....	142
6.4	Diffusion	.....	148
6.5	Black body radiation	.....	156
Index		.....	169

目 次

第1章 熱力学の基礎	3
1.1 はじめに	3
1.2 気体分子に関する初期の研究	5
1.3 理想気体の状態方程式	11
1.4 等温圧縮と等温膨張	21
1.5 断熱圧縮と断熱膨張	23
第2章 数学のエクササイズ	31
2.1 微分の物理的な意味とは？	31
2.2 円周の長さの求め方	35
2.3 球の表面積の求め方	37
第3章 熱力学の法則	43
3.1 熱力学とは何だろう？	43
3.2 熱力学第1法則	43
3.3 熱力学第2法則：秩序と無秩序	45
3.4 エントロピー	49
第4章 分 布	57
4.1 分布とは何だろう？	57
4.2 気柱の中の空気の密度分布	57
4.3 ボルツマンの法則	67
4.4 一般的なポテンシャルの分布についての概念	75

第5章 熱力学から考える様々な現象	87
5.1 気相・液相・固相という物理的な相について	87
5.2 理想気体の速度分布	93
5.3 ブラウン運動	99
5.4 熱雑音	111
5.5 蒸発	117
 第6章 応用編：熱力学的な概念を使って	 131
6.1 拡散のプロセス	131
6.2 ドリフト速度	139
6.3 電気抵抗	143
6.4 拡散	149
6.5 黒体放射	157
 索 引	 171

This book is to learn a very important subjects in physics: Thermodynamics. This apparently boring topic is instead taught here in a fun and thought-provoking way.

Remember that Newton though that heat was a sort of liquid and that Brown looking at what we call now Brownian motion thought that inert particles were alive!

In this book you will learn how scientists discovered the fundamentals of all physics and modern sciences: the nature of heat, the existence of atoms, the properties of gas and molecules and up to the quantization of energy.

You will learn these things in a graceful way, step-by-step here. So please sit back and enjoy studying!

Chapter 1 Basics for thermodynamics

1.1 Introduction

Thermodynamics is a very important branch of physics, it deals with the behavior of many particles and tries to use mathematics in order to control and estimate the global behavior of a great number of independent objects (molecules, particles, charges... you name it!). For example, if we consider the movement of a single molecule in a gas, we can imagine that its movement is chaotic, that the particle will act like a ball colliding randomly with other molecules or other objects around it. Of course we know very well the basic physics of such movements. A straight line, a collision and another straight line again. This is easy Newtonian physics.

But, the problem is that it is clearly too complex to use standard physics to describe an ensemble of a great number of molecules. If we wanted to do so, we would need a number of equations equal to the number of molecules involved. This means, for just a mole of gas, about 10^{23} equations! Clearly this is absurd. Then how can we explain collective molecular phenomena like the temperature, the pressure of a gas, or other collective phenomena like diffusion, Brownian motion or electric conduction? These are the problems that thermodynamical approaches and solves with very good approximations in many cases.

In this book we try to explain the fundamentals of thermodynamics. Especially we want to make the student to understand how some solutions are achieved. We want to give the method to reach a solution in order that he can derive it again by him/herself without the need of the book. Or better, we hope this book will give students a new “way of thinking” and to develop his/her own ability to derive thermodynamical solutions for general

第1章 熱力学の基礎

1.1 はじめに

熱力学は物理の学問のなかでも、とても大切な分野である。というのも、沢山の粒子の振る舞いについて扱うものであり、数学を用いて沢山の物体（分子、粒子、電荷・・・その他何でも）の包括的な振る舞いについて、調べたり見積もったりするためのものだからである。例えば、あなたが気体中の1つの原子の動きについて考える時、その動きは無秩序で、その分子がまわりの気体分子と衝突しながらランダムに動くボールのようなものを想像するのではないだろうか。私たちは、まっすぐに進んで他の分子と衝突し、その後もまっすぐに進むという基礎的な物理についてはよく知っている。これはとても簡単なニュートン物理学である。

しかし、問題は、沢山の数の分子の記述を考える時には、ごく基礎的な物理法則で記述できる運動でもとても複雑になってしまうということである。その沢山の数の分子の運動を考えようとすると、分子の数だけ方程式を考えなくてはならない。これはつまり、たった1モルの気体だとしても、 10^{23} もの式を考えなくてはならないということである！ 明らかにこれは無理な話である。それでは、どうやって温度や圧力、拡散、ブラウン運動、電気伝導といった集合した分子の振る舞いを考えればよいのだろうか。これが熱力学の扱うべき問題であり、そしてまた、様々な場合、非常によくこれらの現象を解き明かす術なのである。

この本のなかで、私たちは熱力学の基礎的な事柄について説明する。なかでも、学生の皆さんが「どうやってその考えを導くのか」といった点に重点を置いた。皆さんが、教科書を見なくても自分の力で答えにたどり着くような力を身につけることを期待している。あるいは、自分の力で「どうやって考えるか」という方法を皆さんに提示し、これを応用して他の一般的な新しい問題について、自分の力で答えを導いて欲しいと思う。

and even new problems.

The book is based on the “Thermodynamics” course (named also “Micro phenomena”) in Yokohama City University. We accept both Japanese and International students, so English vocabulary is simplified and we tried to avoid complex phrases in order to be more easily understood by international readers. A full translation with rephrasing and comments about English expressions is also provided on the opposite side of each page for the Japanese student.

1.2 First experiments with gases

Since many years ago people studied the properties of gases. Even in the late 1600, Mr. Boyle discovered that the product Pressure by Volume $PV^{1)}$ is always a constant, if the amount of gas and its temperature do not change. The experimentalist at the time of Boyle (1650), could measure the expansion with an apparatus that is represented in principle in the figure 1.1:

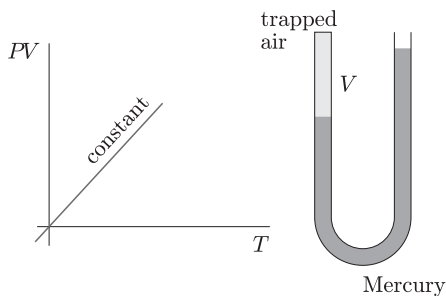


Fig. 1.1 A schematics of the apparatus used by Boyle in 1662. In the graph it is represented the linear behaviour with temperature, however Boyle didn't know that $PV = NkT$ at that time. He only knew that the product PV was a constant, if T was constant, independently by gas composition or nature.

1) 基本のルール：物理量はイタリック（斜め文字）で表記する．レポートを書く時には物理量に気をつけて斜体にしてみよう．単位は立体（普通の文字）を使う．

この本は横浜市立大学の熱力学の授業に基づいて書かれている。授業は日本人と、そして外国人の両方のためのものである。英語の語彙は複雑な言い回しではなくごく平易なものを使用し、英語を母国語としない外国人にもわかりやすいように努めた。反対側のページには（つまり、こちらのページ）日本人の学生のために、日本語で書いてある。

1.2 気体分子に関する初期の研究

遥か昔から、人々は気体の性質についての研究を行ってきた。1600年代の後半という遠い昔でさえ、ボイルは気体の量や温度が変化しない場合、物質の圧力と体積の積が常に一定であるという法則を発見した。1650年のボイルの実験は、図 1.1 のような気体の膨張を測定することができる装置を用いて行われた。

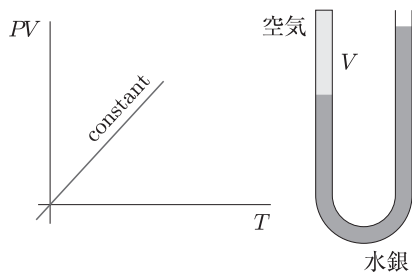


図 1.1 1662 年、ボイルによって用いられた装置の模式図。左のグラフは、圧力と体積の積が温度に対して線形に比例する関係を示している。ボイルはこのとき $PV = NkT$ の関係は気づいていなかった。ボイルはただ気体の組成や性質によらず圧力と体積の積が一定になると気がついていただけだった。

A fixed amount of air was trapped inside this J shaped tube. Boyle changed the amount of mercury in the tube in order to exert more or less pressure on the air. With this simple system he could measure both the air volume and the pressure exerted by the mercury on it. At constant temperature, he was surprised to find the famous relation $PV = \text{constant}$. More surprisingly he discovered that this was true for any kind of gas he put inside his J shaped tube! There was a linear relation between the product²⁾ PV and the temperature T . Boyle noticed that the inclination of the line was approximately the same, for any gas, if he inserted about the same number of molecules. And this was true for ANY gas they tried! Why this was happening? This fact, now called “Boyle law”, it is amazing. Why it is amazing? Because of its simplicity! This result is so simple that it is easy to miss what is quite remarkable about it.

Gases come in many different forms. We might have a very light gas like helium, the gas used to lift balloons, whose molecules are little spheres. Or we might have a denser gas like the oxygen of the air, whose molecules are dumbbell shaped. Or we might have a vaporized liquid, like water vapour, whose molecules are shaped something like the letter “Y”. In every case, the same law holds, even if the oxygen or water vapour are mixed up with another gas like nitrogen in the air. Even though nothing in the law takes note of all these differences, still this law works...!

Later in the 1700 century J. Charles and J.L. Gay-Lussac discovered that there was some kind of linear dependence with temperature, now we call these laws the Charles law ($V/T = \text{constant}$) and the Gay-Lussac law ($P/T = \text{constant}$).

2) product は積のこと. ちなみに和 : sum, 差 : difference, 商 : quotient.

この図について詳しく説明しよう。まず、ある一定量の空気がアルファベットの J の形をした管に閉じ込められており、水銀の量を調節することで、空気に働く圧力の大きさをコントロールできるようになっている。この単純な仕組みを使って、ボイルは空気の体積と空気が水銀から受ける圧力を測定した。一定の温度条件での測定結果から、ボイルは有名な $PV = \text{一定}$ の関係を発見して驚いた。そしてもっと驚くことに、J 管に閉じ込める気体の種類を変えても、その法則は成り立ったのであった。

圧力と体積の積 PV と温度 T の間には、線形に比例するという関係がある。ボイルはこの比例係数について、気体の分子量を揃えて J 管に閉じ込めると、どの気体についても同じだということに気がついた。どんな気体を試してもそうなったのだ。なぜだろうか。ボイルが見つけたこの法則は、まさに現在「ボイルの法則」と呼ばれるもので、素晴らしい発見だった。何が素晴らしいかというと、その単純さである。この関係はとてもシンプルなので、私たちは通常この法則が非常に注目に値するものだということを忘れがちである。

気体分子は様々な形態をとる。例えば、風船を浮かすのに使われているヘリウムはとても軽くて、その分子の形は小さな球形のようにになっている。空気中に存在する酸素のように集まっている気体もある。酸素分子はダンベルのような形をしている。水蒸気はアルファベットの Y の字のような形をしている。ボイルの法則は、分子の形が違っていても同じ法則が成り立ち、また、大気のように様々な形の分子の酸素や窒素が混ざり合っている場合にも成り立つ。つまり、その気体分子の形の違いを知らなくても、この法則は成り立つ。

17 世紀後半、J. シャルルと J.L. ゲイ=リュサックは、温度に対して線形の依存性があることを発見した。これは現在私たちが、シャルルの法則（圧力が一定の場合に $V/T = \text{一定}$ ）あるいはゲイ=リュサックの法則（質量と体積が一定の場合に $P/T = \text{一定}$ ）と呼ぶものである。

Example 1.1

Suppose you are Boyle in 1662. You trap in the “J” shaped tube a fixed amount of air. Changing the amount of mercury, you change the amount of pressure that is exerted on the gas (air). You first measure pressure and volume and you obtain these values:

$$\begin{aligned} V_1 &= 1 \text{ cm}^3 (= 10^{-6} \text{ m}^3) \\ P_1 &= 0.1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1.1)$$

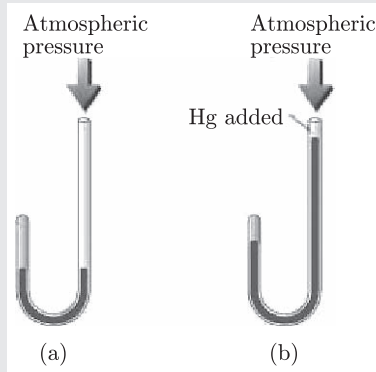


Fig. 1.2 A schematic of the apparatus used by Boyle in 1662. You change the amount of mercury on the column to change the pressure on the gas (panel a and b). Keep PV constant and calculate the new pressure using MKS units

Then you add more mercury in the column. The weight of the column is now the equivalent of 380 mm of mercury over the atmospheric pressure, about 0.05 MPascal, so you have:

$$P_2 = 0.15 \text{ MPa}$$

can you calculate the volume you expect in this case? Please use MKS units³⁾, Pascal is already in MKS units (1 Pa = 1 Newton per one square meter⁴⁾).

Answer: $V_2 \approx 6.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

例題 1.1

あなたが 1662 年のボイルだと想像して、考えてみよう。J の形の管に、ある量の気体を封じ込めた。水銀の量を変えることで、閉じ込めた気体に加わる圧力を変えることができる。まず最初に、圧力と体積を測ると、

$$\begin{aligned} V_1 &= 1 \text{ cm}^3 (= 10^{-6} \text{ m}^3) \\ P_1 &= 0.1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1.1)$$

という値を得た。

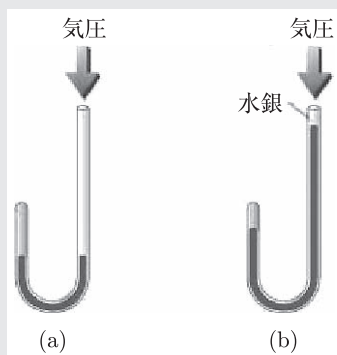


図 1.2 ボイルが 1662 年に用いた実験装置の模式図。気体にかかる圧力を変えて、水銀の量を変えることができる ((a) および (b) 参照)。 PV を一定に保ち、変化させた圧力を MKS 単位系を使って考えよう。

次に、先ほどの状態からさらに水銀を加えた。380 mm の水銀柱の管の重さ分の圧力が、閉じ込められた気体にかかっている。この圧力分は、およそ 0.05 MPa なので、閉じ込められた気体の今の圧力は

$$P_2 = 0.15 \text{ MPa}$$

であるとわかる。このとき、体積はいくつになっているだろうか？ ただし MKS 単位系を使うこと (Pa はすでに MKS 単位。1 Pa = 1 N/m²)

答え: $V_2 \approx 6.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3$

1.3 The law of ideal gases

To put together all these relations found by these researchers, we have to understand one of the oldest mystery of science: what is the physical meaning of temperature? We know that material can be hot or cold at touch. But what does that means in physical terms? How do we determine the real nature of the temperature?

Well, we consider a piston full of gas, like in figure 1.3. If we suppose that inside this piston there are N particles, what is the force exerted on the piston? Well, the answer is easy. By definition, if the piston has an area A , the pressure on it is

$$P = \frac{\langle F \rangle}{A} \quad (1.2)$$

where the symbolism $\langle F \rangle$ means *the average force* F .

Now, for sure we can measure the average force on the piston $\langle F \rangle$, but

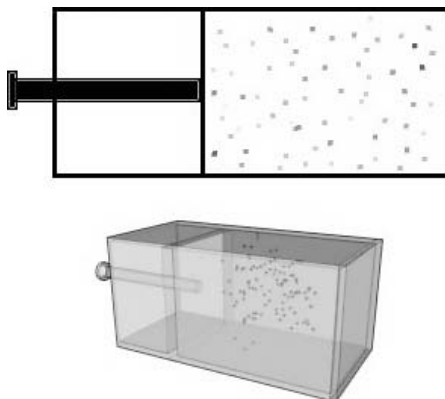


Fig. 1.3 A gas piston with gas molecules in it.

3) MKS units: MKS 単位系. メートル (m), キログラム (kg), 秒 (s) を基本単位とする単位系のこと. 科学論文では MKS 単位系を使うのが一般的.

4) square: 2 乗のこと. ここでは m^2 という意味.