

基礎化学

General Chemistry

名古屋工業大学 先進セラミックス研究センター

井田 隆

はじめに

Preface

名古屋工業大学では、全学で実施する教養教育の中の**物理化学**と呼ばれる分野で、「化学結合論」と、主に**化学熱力学** ケミカルサーモダイナミクス **chemical thermodynamics** (熱化学 thermochemistry) (補足0.A) について基礎を学ぶ「基礎化学」の授業を提供するカリキュラムが設定されています。この授業は、**社会工学科環境都市分野・経営システム分野** 1年次の学生を受講対象学生として、2018年度と2019年度に担当したものです。

熱力学 サーモダイナミクス **thermodynamics** は、**統計力学** スタティスカルメカニクス **statistical mechanics** と呼ばれる学問の分野と近い性格を持っています。例えば、**エネルギー**や**エントロピー** (補足0.B) などの概念は、熱力学でも統計力学でも重要な主題です。ただ、特に「エントロピー」はなかなか理解しにくく、正しくその知識を活用することが難しい面もあるでしょう。

高校の物理で習う「**熱力学第一法則**」(エネルギー保存則)と「**熱力学第二法則**」(エントロピー増大則)のうち、熱力学第一法則は、誰でも無理なく受け入れられるのに対して、「熱力学第二法則」の意味はつかみにくく、そもそもエントロピーの意味がはっきりしない...と思うことは、おそらくほとんどの人が経験することでしょう (補足0.C)。

それでも、資源・環境・エネルギー問題に取り組もうとするなら、熱力学第二法則は決定的に重要です。

「熱力学的なエントロピー」は「温度」と言う概念と結びついています。

2019年5月20日以降、**国際単位系** (International System of Units) (仏: *Système International d'Unités*) (エスアイ **SI**) では (それに伴って日本の計量法・関連規則でも) 7つの基本的な物理量 (時間・長さ・質量・電流・温度・物質質量・光度) に関する単位 (7つの基本単位 ベース ユニット **base unit**) ($s \cdot m \cdot kg \cdot A \cdot K \cdot mol \cdot cd$) のうち、4つの基本単位 ($kg \cdot A \cdot K \cdot mol$) の定義が根本的に変更されることになりました (補足0.D)。

特に温度の単位である ^{ケルビン}K の新しい定義は、従来の定義のしかたから大きく変わり、
「ボルツマン ^{ボルツマン}Boltzmann 定数 k_B が、 $k_B = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ と表されるように、温
度の単位 ^{ケルビン}K を定める」とされました。（従来の定義との違いが実用的に問題になる例
は稀だとしても）2019年以降は「熱力学」「統計力学」の考え方を受け入れなければ、
「温度」の正確な意味を知ることもできなくなっています。

また、特に経営システム分野では「確率・統計論」と、その応用が重視されることになり
ます。昔の（今でも？）高校の物理・化学で習う内容が、統計学的な考え方・手法でどの
ように解釈されるか知っておくと良いでしょう。

この授業では、はじめに最も基本的な「統計学的」な物理量とも言える「圧力」と「温度」
について取り上げます。そのうちで、「圧力」についての考え方は、まだ受け入れやすい
でしょう。「温度」をどのように理解すべきかについては、世界でトップ・レベルの研究
者にとっても悩ましいものであった歴史があるようなので、簡単なことではないと言うこ
とは、当然のことのように思います。

第1部 圧力と温度

Pressure & Temperature

1. 圧力 Pressure

1-1 圧力の単位 Unit of pressure

「温度」と比べると「圧力」の方が受け入れやすい概念でしょう。圧力とは「面積あたりに加わる力の強さ」のことだと教わるでしょうし、そのこと自体は間違っていない。

圧力の単位として Pa が用いられ、1 m² の面積に 1 N の力を加えた時の圧力が 1 Pa として定義されます。1 N の力は 1 kg の質量に 1 m s⁻² の加速度を与える力の強さと定義されるので、重力加速度が概ね $g \approx 9.8 \text{ m s}^{-2}$ であることから、1 N の力とは、

「1/9.8 = 0.102 kg の質量を持つ物体の重さ」と同じ程度の力の強さです (補足 1.A)。

過去には atm (気圧), bar (バール), kgw/cm⁻² (キログラム重毎平方センチメートル), psi (平方インチあたりのポンド重) など様々な圧力単位が用いられていたのですが、1990 年代以降には、その多くが Pa に置き換えられるようになりました (補足 1.B)。

唯一の例外とも言えるのは「^{ブラッド プレッシュヤ} 血圧 blood pressure」で、血圧には現在でも mmHg (ミリメートル水銀柱) という単位が用いられています。

1-2 圧力と応力 Pressure & Stress

「圧力は 2 階のテンソル量である」と言われることがあります。これは、圧力が「3 行 3 列の行列で表現される」ことを意味します。特に圧力が 2 階のテンソル量であることを強調する場合に ^{ストレス} 応力 stress という呼び方をすることがありますが、^{プレッシュヤ} 圧力 pressure と ^{ストレス} 応力 stress は「ほぼ同じこと」と考えても良いでしょう。物理学・材料工学・機械工学などの分野ではそのように扱われます。土木・建築分野だけは例外で、力の強さのことを ^{ストレス} 応力と呼び、他の分野で ^{ストレス} 応力と呼ぶことを **応力度 stress intensity** と呼ぶそうです。いずれにしても、このことは、建築材料など構造材料の機械的な強度の評価をする場合にも重要です。

機械的な強度を評価するための代表的な試験方法として「圧縮試験」「引張り試験」「曲げ試験」があります。特に圧縮試験 (図 1.1) は建築・土木材料として重要なコンクリートの強度を評価するために基本的な試験方法です。

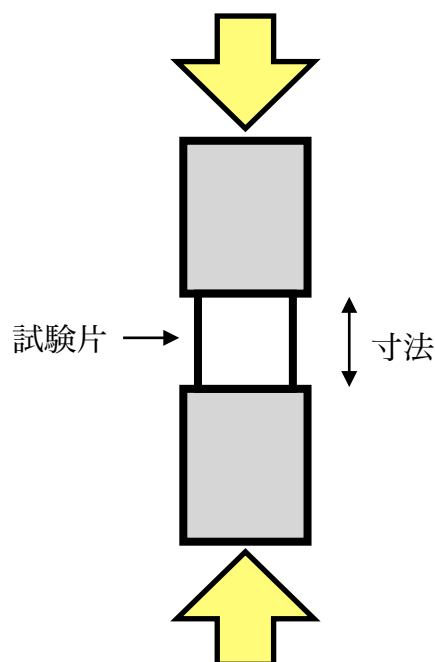


図 1.1 圧縮試験。加えた力と変位（寸法の変化）を同時に測定する。力の強さを断面積で割った値（応力または応力度）と変位の関係を記録する。

1-3 気体分子運動論での圧力 Pressure in kinetic theory of gases

高校物理・高校化学で「ボイル・シャルルの法則」や「(理想) 気体の状態方程式」などの気体の性質を習うと思います。高校3年の物理で「気体分子運動論」を習う場合もあるようです。この気体分子運動論 カインティック セオリー オヴ ガセズ kinetic theory of gases が、「統計力学」の基本とも言えます。

「気体は速くランダムに動く多くの微小な粒子（分子）からなる」とみなす考え方を気体分子運動論と呼びます。気体の圧力や温度、粘度、熱伝導度、体積などの巨視的な物理量は、気体分子の組成や運動について考えることで説明されます。

気体分子運動論では、気体を示す**圧力**は「器壁への気体分子の衝突によって生ずる」とします。この考え方を受け入れられるかが、統計力学へ向かうための最初の難関かもしれません。

容器の内側にある気体分子が衝突してきたら、器壁は外向きの力を受けるでしょう。でも衝突で力を受けるのは一瞬のことなので、衝突の頻度（時間当たりの回数）が高くなったとしても、常に変動する力を受け続けることになるだけで、一定の圧力を受けることにはならないのではないのでしょうか？これは、当然の疑問のように思います。

結論としては「普通の条件では気体分子の衝突頻度が高くなりすぎて、その圧力変動を検出できるほど鋭敏な測定器は存在しないので、変動する圧力を「時間で平均した値」しか現実には観測できない」と言うことになりそうです。

気体分子運動論を受け入れれば、粒子の数と運動の仕方が変わらない状態で体積を変化させると、器壁の単位面積あたり単位時間あたりの粒子の衝突数は体積に反比例するはずなので、「圧力が体積に反比例する」という **Boyle の法則** がすぐに導かれます。

単純化して、質量 (mass) m 速度 (velocity) $+v$ の粒子が器壁に弾性的に衝突し、速度が $-v$ になったとすると、器壁は運動量 momentum 変化の $2mv$ に相当する **力積 impulse** (「力の強さ」と「力が働く時間」をかけた値) を受けることになり、衝突の頻度 frequency (単位時間あたりの衝突の回数) が f だとして、時間で平均をとれば mvf に比例する力を受けるはずで、衝突の頻度 f はやはり速度 v に比例するので、衝突する粒子から器壁の受ける力 (圧力) は **粒子の運動する速度の二乗 v^2** に比例します。

(補足 0.A) 化学熱力学と熱化学

「化学熱力学 **chemical thermodynamics**」と「熱化学 **thermochemistry**」と言う2つの言葉は、ほとんど同じ意味で使われますが、「化学熱力学」と言う言い方には、「熱力学の発展形」というニュアンス (意味合い) があり、「熱化学」と言う言い方には、「19世紀に熱力学が成立する以前から既に始まっていて、化学反応や状態変化と熱との関係を説明しようとして研究されてきた学術的な体系」というニュアンスがあるかもしれません。

確かに歴史的に見ると、17-18世紀の英国の科学者 **Robert Boyle** (高校化学で習う「Boyleの法則」で有名。「近代化学の祖」とも)、フランスの科学者 **Jacques Charles** (高校化学で習う「Charlesの法則」に名前が残る)、18-19世紀のフランスの科学者 **Joseph Gay-Lussac** (「Charlesの法則」を定式化した。「気体反応の法則」でも有名。)、フランスの化学者 **Antoine Lavoisier** (高校化学で習う「質量保存の法則」で有名だが、「熱量保存則」も提唱していた。「近代化学の父」とも)、フランスの科学者 **Pierre-Simon Laplace** (数学者として有名だが、音速と媒質の力学的な性質を関係づける「ニュートン・ラプラス式」、表面張力を説明する「ヤング・ラプラス式」なども有名)、19世紀のロシアの化学者 **Germain Henri Hess** (高校化学で習う「Hessの法則」で有名) など、「熱化学」と言う分野は、19世紀中期以前に、独自の発展をした経緯があります。

それに対して、熱力学第一法則に相当する内容はドイツの科学者 **Julius Robert von Mayer** (「マイヤーの関係式」に名前が残る) が1842年に発表したのが初めてとも言われ、その正しさをドイツの物理学者 **Rudolf Clausius** が「熱力学の第一法則」(エネルギー保存則)として明確に示したのは、19世紀中期以降です。「化学エネルギーと熱エネルギーの和が一定」と言う意味の「Hessの法則」に相当する内容は1840年に発表され、確かに「熱力学第一法則」と似た意味があります。「どちらかという **Mayer** や **Clausius** より、**Lavoisier** や **Hess** の方が、早く『エネルギー保存則』を見つけたことになるのでは？」と思う人もいるかもしれません。

熱力学第一法則 (エネルギー保存則) は、現代では当たり前のことのように思われるかもしれませんが、この法則の内容に相当することが初めて提唱された19世紀中期まで、「物理学」「化学」を含む欧州 (ヨーロッパ) の「学会 **academic society**」では「熱とは、**カロリック caloric (calorique)** (熱素) という流体によるものだ」と解釈する「カロリック理論 **caloric theory**」が主流でした。**熱力学第一法則** には「**カロリック**」の存在自体を否定する意味があり、その意味で画期的だったのです。

熱力学第一法則には、単に「エネルギーが保存する」というだけでなく、「熱源を利用する動力装置（熱機関）を作動させる時、熱エネルギーと力学的なエネルギーを合わせた合計のエネルギーは変わらない」「『熱』とは、力学的なエネルギーと同じ『エネルギー』の現れ方の一つである」「『カロリック』という特別な概念は必要ない」という意味がありました。19世紀初頭には既に蒸気機関 スチーム エンジン steam engine が実用化されていたのですが、蒸気機関が「熱エネルギーを力学的なエネルギーに変換するものである」という理解のしかたは、されていなかったようです。

ラヴォアジエ Lavoisier はそれまでの化学の分野では主流だった「物質の燃焼はフロギストン フロギストン phlogiston（ねんそ燃素）という元素の放出によるものだ」と解釈する「フロギストン理論 phlogiston theory」を否定して、「燃焼は酸素との化学反応によるもので『フロギストン』と言う概念は必要ない」ことを初めて明確に主張した人物です。ところが、この時点で ラヴォアジエ Lavoisier は「カロリック」（熱素）の存在は前提としていて、ラプラス Laplace とともに高いレベルで「カロリック理論」を完成させたと言える立場だったようです。18世紀に ラヴォアジエ Lavoisier は「熱量保存則」を導いていたのですが、「質量保存則」と同じように「カロリックが保存する」とする考え方だったので、**熱力学第一法則**とは、意味が違います。

ヘス Hess の法則は「熱エネルギーと化学エネルギーの合計のエネルギーは変わらない」という意味を持つ点で、もちろん画期的だったと思いますが、このことは、完成度の高い「カロリック理論」を前提としても説明できるでしょうから、やはり熱力学第一法則とは意味が違います。

エントロピーという概念と「**熱力学第二法則（エントロピー増大則）**」も「**熱力学の第一法則（エネルギー保存則）**」と同じ19世紀中期に成立したのですが、それは19世紀初頭に36歳で夭逝した（若いのに早く死んだ）フランスの研究者 サディ カルノー Sadi Carnot による熱機関 ヒート エンジン heat engine についての研究成果が、こうせい後世に英国の ウィリアム トムソン ケルヴィン William Thomson（Kelvin 男爵）やドイツの クラウジウス Clausius らにより再評価されたと言う面が強いです。

熱機関は熱エネルギーを力学的なエネルギーに変換する働きをします。その力学的なエネルギーは、例えば物を持ち上げるために使うこともできます。「持ち上げられた物の位置エネルギー」に「カロリック（熱素）」と言う要素を含められる余地はありません。この事実から、カロリックの存在も「カロリック理論」も否定されることとなります。

現在では、カルノー Carnot が**熱力学第二法則（エントロピー増大則）**に相当する内容を世界で初めて明確に示したと認められています。カルノー Carnot 自身の著作には「カロリック」の存在を前提とする記述も含まれるようですが、カルノー Carnot がカロリック理論の問題点を意識していたとしても、論文や著書として発表する場合には、その当時の「学会」から内容の承認をされなければならなかったでしょうから、「カルノー Carnot はカロリック理論を信じていた」とは限らないと思います。

（補足 0.B）エネルギーとエントロピーの語源

エナジー エネルギー energy という語は、「活発なこと アクティヴィティ activity」「操作・運転 オペレーション operation」の意味の古代ギリシャ語 エネルゲイア ἐνέργεια（ラテン翻字: energeia）に由来し、この エネルゲイア ἐνέργεια という語は紀元前4世紀に アリストートル Aristotle が使ったのが初めてかもしれないと言う説があります。ただし、エネルゲイア ἐνέργεια という語は「幸福 ハピネス happiness」「喜び プレジャ pleasure」などの意味も含みうる「定性的哲学的概念 クオリタティヴ フィロソフィカル コンセプト qualitative philosophical concept」であったとも言われます。

17世紀にドイツの哲学者・数学者 ゴットフリート ライブニッツ Gottfried Leibniz は「運動エネルギー」に相当する量を表すために、「リヴィング フォース living force」という意味のラテン語 vis viva という語を用いました。

1807年に英国の物理学者 **Thomas Young** が著書『自然哲学講義』(英: A Course of Lectures on Natural Philosophy)の中で、それまで使われていたラテン語 *vis viva* の代わりに *energy* と言う語を使ったのが、エネルギーと言う言葉を現代と同じ意味で使った初めてのことだったと言われます。

「エネルギー」の語源となったとされるギリシア語の *ἐνέργεια* は、*ἐνεργόν* (ラテン翻字: *energon*) という語とも関連し、これは、*ἐν* という接頭辞 prefix と「仕事 work」を意味する *ἔργον* という語を組み合わせた語であり、「(物体に蓄えられた) 仕事をする能力」という意味合いを含みます。

エントロピー *entropy* という語の由来は比較的はっきりとしていて、1865年に Clausius が、「*ἐνεργόν*」の「*ἔργον*」を「変換・変形 transformation」を意味するギリシャ語「*τροπή*」に置き換えて、*energy* (独: *Energie*) と対になる言葉として *entropy* (独: *Entropie*) という語を用いたのが初めてのことのようです。

「エネルギー」が「仕事をする能力」という意味合いを含むのと同じように、「エントロピー」には「変換・変形をする能力」という意味合いが含まれます。

ちなみに**エンタルピー** *enthalpy* という語は「エネルギー *energy*」「エントロピー *entropy*」と同じようにギリシア語の接頭辞「*ἐν*」に「暖かさ *warmth*」「熱 *heat*」の意味のギリシア語「*θάλπος*」を付けたもので1920年にオランダの物理学者 **Heike Kamerlingh Onnes** (液体 He の超流動を発見) が初めて使ったとされています。

(補足 0.C) エントロピーの理解のしにくさ

エントロピーは「乱雑さ」を表すと言われることがあります。そのこと自体は間違っていないと思いますが、一方で、エントロピーとは、熱力学あるいは統計力学で明確に定義される**示量性の状態量**です。エントロピーが「乱雑さ」を表すとして、その「乱雑さ」をどのように測定あるいは計算できるのかが示されるのでなければ、あまり意味がないでしょう。「エントロピーは乱雑さを表すものだ」と言われても、エントロピーを説明できていることにはならないように聞こえます。

2章で、エントロピーと言う概念がどのように導かれたか、どのように計算できるか、熱力学第二法則がどのような意味なのかについて触れますが、やはり少し話が込み入っていて、フォローしにくい面があるだろうと思います。

(補足 0.D) 2019年の国際単位系の再定義

国際単位系には7つの**基本単位 base unit** : 「(1) 時間の単位 *s* (秒)」「(2) 長さの単位 *m*」「(3) 質量の単位 *kg*」「(4) 電流の単位 *A*」「(5) 温度の単位 *K*」「(6) 物質量の単位 *mol*」「(7) 光度の単位 *cd*」があります。

2019年には、このうちの4つの単位「質量の単位 *kg*」「電流の単位 *A*」「温度の単位 *K*」「物質量の単位 *mol*」の定義 *definition* に根本的な変更が行われました。

「時間 *time* の単位 *s* (秒)」は、基底状態の ^{133}Cs (セシウム-133) 原子の超微細準位間の遷移周波数 *ground-state hyperfine transition frequency* が *Hz* (s^{-1}) の単位で 9 192 631 770 という固定数値で表されるように定義される」と言うことは、それ以前と変わっていません。つまり「1 *s*」とは、「基底状態の ^{133}Cs (セシウム ^{133}Cs) 原子の超微細準位間の遷移による電磁場の変化が 9 192 631 770 回 (9 十 1 億 9 千 2 百 6 十 3 万 1 千 7 百 7 十回) 起こる時間」です。

「長さ ^{レンクス} length の単位 ^{メートル} m は、真空中での光速 c が m s^{-1} の単位で 299 792 458 という固定数値で表されるように定義される」（つまり、真空中での光速は厳密に $c = 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ と表される）ということも、それ以前と変わっていません。「1 m」とは「真空中で光が $1/299\,792\,458\text{ s}$ (2億9千9百7十九万2千4百5十八分の1秒) の時間に進む距離」です。

「質量 ^{マス} mass の単位 ^{キログラム} kg は、プランク ^{プランク} Planck 定数が、Js (ジュール・セカンド) ($\text{kg m}^2\text{ s}^{-1}$) の単位で $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ という固定数値で表されるように定義される」（つまり、プランク定数は厳密に $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ Js}$ と表される）と変更されました。どうしてプランク定数を決めれば質量が決まることになるかは簡単ではありませんが、大まかには「1 kg という質量は、電子の (静止) 質量を基準にして再定義された」と考えても同じことです。電子の質量 m_e とプランク定数 h の間には、

$$m_e = \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \quad (0.D.1)$$

の関係があります。ここで c は光速で、 R_∞ (アール・むげんだい) はリュードベリ ^{リドバーグ定数} Rydberg 定数、 α (α はギリシャ小文字のアルファ) は微細構造定数と呼ばれます。リュードベリ定数と微細構造定数は分光測定で正確に値がわかるので、プランク定数が決まれば電子の質量や特定の同位体の原子核の質量が決まるという関係があるそうです。言い換えれば「1 kg」は「電子 (1 kg) / ($9.109\,383 \dots \times 10^{-31}\text{ kg}$) $\approx 1.097\,769 \dots \times 10^{30}$ 個分の質量」のように定義し直されたということになります。

「電流 ^{エレクトリック カレント} electric current の単位 ^{アンペア} A は、素電荷 (電気素量) ^{エレメンタリー チャージ} elementary charge e が ^{クーロン} C (As) の単位で $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ という固定数値で表されるように定義される」（つまり、素電荷は厳密に $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$ と表される）と変更されています。「1 A」とは、「1 s の時間の間に電子が $(1\text{ C}) / (1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}) \approx 6.241\,509\,07 \dots \times 10^{18}$ 個通過する電流の強さ」です。

「熱力学温度 ^{サーモダイナミック テンパラチュア} thermodynamic temperature の単位 ^{ケルビン} K は、ボルツマン ^{ボルツマン} Boltzmann 定数が、 J K^{-1} ($\text{kg m}^2\text{ s}^{-2}\text{ K}^{-1}$) の単位で $1.380\,649 \times 10^{-23}$ という固定数値で表されるように定義される」（つまりボルツマン定数は厳密に $k = 1.380\,649 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$ と表される）と変更されています。このことについては、2章で検討します。

「物質 ^{アマウント オヴ サブスタンス} amount of substance の単位 ^{モル} mol は、1 mol が正確に $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 個の要素体 ^{エレメンタリー} elementary entity を含むものとして定義される」と変更されました。また「この数値 $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ は単位を mol^{-1} で表現した時のアボガドロ定数 ^{アヴォガドロ コンスタント} Avogadro constant N_A の値を固定値とするものであり、アボガドロ数 ^{アヴォガドロ ナンバー} Avogadro number と呼ぶ。系 system の物質は、記号 n で表され、特定の要素体の数を表すものである。原子・分子・イオン・電子・他の粒子、あるいは特定の粒子の集団 ^{グループ} group を要素体として扱える」とされています。アボガドロ定数は厳密に $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ と表され、「アボガドロ数」は $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ という「単位の付かない数」(無名数) を意味します。「要素体 elementary entity」という言い方に回りくどさを感じるかもしれませんが、例えば NaCl 結晶では「NaCl」に分子と言う意味はありませんが「1 mol の NaCl」と表現しても良いのは「特定の粒子の集団を要素体として扱える」ルールがあるからなので、うまい定義の仕方のように思われます。

「ある方向への光度 ^{こうど ル ミ ナ ス インテンシティ} luminous intensity の単位 ^{カンデラ} cd は、周波数 $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ の単色光の輻射 (放射) の発光能 ^{ル ミ ナ ス エフィカシー} luminous efficacy K_{cd} が、 lm W^{-1} (cd sr W^{-1} あるいは $\text{cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$ と同じ) の単位で 683 という固定数値で表されるように定義される」と言うことは変更されていません。「周波数 $f = 540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ の単色光」とは、波長 $\lambda = c/f = (299\,792\,458\text{ m s}^{-1}) / (540 \times 10^{12}\text{ s}^{-1}) \approx 555.17\text{ nm}$ でヒトの可視光領域波

長の中心付近の波長の緑色の光を意味します。この光（光源）の照明としての能力が $K_{cd} = 683 \text{ lm W}^{-1}$ と表されることとなります。なお lm は光束 luminous flux の単位で、光束とは、点光源の場合には全立体角 $4\pi \text{ sr}$ にわたって放出される単位時間あたりの光の総量を表します。立体角 solid angle の単位には sr が用いられます。単位面積当たりに入射する光束は照度 illuminance と呼ばれ、単位 lx で表されます。

気体定数 R とボルツマン定数 k_B 、アボガドロ定数 N_A の間には $R = N_A k_B$ の関係があります。

2019 年以前には、気体定数 $R = 8.314 459 8 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ($\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、ボルツマン定数 $k_B = 1.380 648 52 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ($\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)、アボガドロ定数 $N_A = 6.022 140 86 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ などの「推奨値」の使われる場合が多かったと思いますが、2019 年以降には、ボルツマン定数が十進数 7 桁で $k_B = 1.380 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ と定義され、アボガドロ定数が十進数 9 桁で $N_A = 6.022 140 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と定義されることになったので、結果的に気体定数 R は「厳密に」十進数 15 桁で

$$R = N_A k_B = 8.314 462 618 153 24 \text{ Pa m}^3 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \quad (0.D.2)$$

と表される固定値となりました。

(補足 1.A) 1 ニュートンの力

17-18 世紀の英国の物理・数学者 Isaac Newton が「木から落ちるリンゴを見て万有引力の法則を発見した」という伝説は、事実と違う創作らしいのですが、普通に市販されるリンゴ（「ふじ」「ジョナゴールド」「つがる」「王林」「紅玉」などの品種）は 300 g 程度の質量があります。1 N がリンゴ 1 個分の重さであれば連想しやすいかと思いますが、小さいリンゴとして「姫リンゴ」と呼ばれる品種のうち「アルプス乙女」の果実の重量は 30–50 g 程度で、「姫こまち」の果実の重量は 80–100 g 程度らしいので、「1 ニュートンの力とは、『姫こまち』リンゴ 1 個分程度の重さと同程度の力である」と思えば良いかもしれません。

(補足 1.B) 1 パスカルの圧力

17 世紀フランスの数学・哲学・物理学者であった Blaise Pascal は 39 歳で死去したそうですが、その遺稿がまとめられたとされる著作 Pensées 中の「人間は考える葦である」という文句で有名です。流体に加わる圧力・流体の示す圧力についての「パスカルの原理」でも有名で、このことにちなんで圧力の単位として Pa が用いられているようです。現代的な「確率論」を創始した人物とも言われます。