

第2章 ガスの物理

ガスの科学は、ロバート・ボイルによるボイルの法則の発見から始まったが、これは、空気の研究というだけではなく、化学が中世の錬金術から初めて分離された歴史に残る出来事であった。17世紀に魔法の世界と科学の世界ははっきりと分けられるようになった。

ガスの研究は、物質の根源を探る研究でもあり、多くの物理学者、化学者が現われ、21世紀の今もなお、物質・エネルギー・時空の根源を探る研究が続けられている。

「科学」が発明され、20世紀は科学の世紀になった。信じようが信じまいが、現代の文明は科学によって支えられ、産業ガスのビジネスも20世紀の科学によって生まれた。第2章では、ガス屋のためのガスの科学を学ぶ。

2. ガスの物理

古代より万物の根源をなす「元素」というものがあると考えられていたが、200年ほど前からは、元素を構成する「小さな粒子」、原子説が唱えられるようになった。

化学物質や気体の研究から、原子という非常に小さな粒子があり、これを組み合わせた「分子」というものが存在し、これが、気体やその他の物質を構成しているらしいと考えられるようになった。もし分子が存在するのであれば、様々な現象を科学的に説明できるため、多くの学者がその存在を信じるようになった。しかし、もし分子が存在したとしても、それは非常に小さな「粒子」であるため、誰もそれを見つけることはできなかった。20世紀初頭、空気を分離して酸素を製造する技術が発明されたが、その時、酸素分子はまだ発見されていなかった。その後の研究によって分子や原子は、架空のものではなく実在することが明らかとなったが、わずか100年ほど前までは、人々の想像上のもの、「仮想の粒子」であった。

20世紀初頭に、空気から酸素や窒素を分離する深冷空気分離装置が発明され、酸素の工業生産が始まり、この時、酸素は酸素分子、窒素は窒素分子であると考えられていたが、リンデ社（ドイツ）が酸素製造装置を開発したのは1903年、アインシュタインによって分子の実在を証明する方法が示されたのは1905年のことである。

食品や飲料水、鉱石などは、見たり触れたりでき、大昔から取り引きされてきた「物質」である。工業用の資材や原材料は、直接触れることはできなくても、何か形が想像できる物質である。分子が発見されていなくても、何か「物質」があり、それが利用されてきた。一方、酸素ガスや窒素ガスは、眼では観察することができない「気体の分子」をそのまま製品にしたものである。このような純粋に元素に近い工業製品は、新しい商材であり、酸素という元素の性質を利用するために、空気から酸素分子が分離され、酸素分子を売る商売が始まった。しかし、年表をみると、空気を分離して酸素を製造する産業が始まったとき、酸素分子はまだ未発見の粒子であった。

気体の液化を利用した空気分離装置は、英国、フランス、ドイツの科学者・技術者によって発明されたが、それは、すぐさま米国と日本にも伝わった。1907年（明治40年）、フランスのレール・リキッド社（現エア・リキッド社）が日本に、ドイツのリンデ社が米国に、それぞれ工業ガスを製造するための現地法人を設立し、

酸素製造装置を設置した。1910年には、日本酸素合資会社（現大陽日酸株式会社）が設立され、翌1911年にドイツから酸素製造装置が輸入された。1913年には、日本窒素肥料株式会社（現チッソ株式会社）がフランスから窒素製造装置を輸入した。

1900年のマックス・プランク（ドイツ）の量子論から始まった新しい科学「現代物理学」は、驚くほどの速さで進化し、すぐさま産業技術に利用され実用化・事業化され、欧州発の電気、化学、内燃機関などの最新技術が世界に広まっていたが、工業ガスの製造技術も、極めて短期間のうちに米国と日本に伝わった。

18世紀初頭に英国で始まった産業革命が、後発のロシア、日本、イタリアに広まったのは19世紀後半である。これに比べると、20世紀初頭の科学技術は驚異的なスピードで世界に拡散した。蒸気機関による産業革命に対して、石油、電気による20世紀の技術革新は、第二次産業革命とも呼ばれる。製造業からみた産業革命は、一次：機械化、二次：大量生産、三次：機械の自動化、四次：機械の自律化、というように区分され、その基本となっている科学からみると、一次：古典物理学、二次：現代物理学、三次：電子技術、四次：人工知能と示すことができ、それぞれは全てつながっている。しかし、それまでの常識が覆るという意味では、やはり、古典物理学から現代物理学への変化が最も大きな飛躍をもたらしたように思われる。

空気分離の原料は、大気の下層にある「空気」である。空気は地球上のどこでも等しく入手できる極めて例外的な資源である。したがって、空気を原料として生産される酸素や窒素は、どこかの国で大量に生産して輸出されるという製品にはならない。空気分離の方法を発明した欧州の企業は、米国や日本にガスを輸出するのではなく、ガスを製造する装置とそれを運営する事業、ガスの販売事業を展開していった。後発の国々も、やがて自国製の技術を習得し、空気分離の技術は、工業ガス（産業ガス）という新たな産業のコア技術となった。

工業分野へ応用されたガスの科学は、酸素の大量生産を可能とし、酸素の大量生産は金属の溶接・加工や鉄の大量生産を支え、鉄の大量生産は、世界を急速に工業化させた。酸素と同時に空気から生産される窒素ガスは、化学産業に利用され、そこから広がったガスのハンドリング技術は20世紀後半には半導体の大量生産を可能とした。

産業ガスのビジネスは、20世紀の文明に欠かせないものとなったが、その技術は、20世紀の「現代物理学」なしには考えられないものである。19世紀までの古典物理学とは大きく異なる現代物理学の出現によって、ガスの液化、分離が実現し、ガスを利用したアプリケーション、電子材料や同位体などの技術や商材が理

解できるようになった。ガスの科学には量子論、相対論を基礎にした現代科学の知識や理解が必要である。

図2は、科学の階層を簡単に示したものである。数学は、最も基本的な学問であり、数学を基礎として科学がある。最も基本的で単純な科学は物理現象を扱う物理学であり、「自然界・宇宙」を数学で記述する。物理学が取り扱う世界（時空）は有限であり、無限（無限大、ゼロ、永久）の概念を持つ数学の世界に比べると小さい。

物理学の一部の領域は化学であり、純粋科学と応用科学の橋渡しをしている。純粋科学は人間の知的好奇心を満たすが、応用科学は工学や農学、具体的な産業技術となって文明社会を構築している。

図に示す数学と科学の階層は、下から上にいくにしたがって急速に複雑化する。物理から化学に移るだけでも、観測される現象は極めて複雑であり、未だに全ての化学を数学で記述することはできない。

工学の分野では、さらに現象が複雑となるため、全てが科学的に正しく理解され、説明、記述されている訳ではない。簡単にみえる現象であっても、多くの経験則や工学的理論に頼らざるを得ない。

さらに生物学や人間の科学は極めて複雑、多様であり、物理学の単純さとは対極にある。

ガスの物理学は、基礎科学であり、現象は非常に単純であり、簡単な法則で説明され、数式で記述される。しかし現実のガスの分離、分析、ハンドリング、ガス・アプリケーションには、複雑な化学や工学の見解・手法が用いられている。われわれは物理学者ではなく、実学に基づくガス屋である。第2章では、ガスの理解に必要な物理の基礎と、ガスの周辺技術、応用技術についてまとめる。

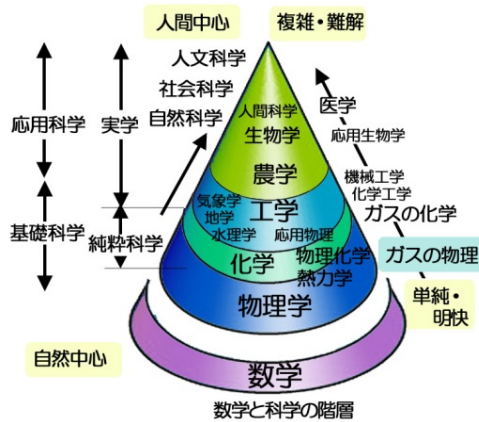


図2 数学と科学の階層

2. 1 気体の液化、分子の発見

2. 1. 1 理想気体 (ideal gas)

2. 1. 1. 1 ロバート・ボイル (Sir Robert Boyle, 1627~1691 年)

ガス (気体) の基本は、理想気体である。ガス屋の最初の勉強は、理想気体の「ボイルの法則」を思い出すところから始まる。ボイルの法則は、小中学校の理科の教科書で解説される最もポピュラーな気体の科学であり、これを解説するための様々な教育用の実験が考案されている。ガス (気体) は、目で見ることも顕微鏡で見ることもできないが、空気や風の存在で何となくその存在を実感することができ、ボイルの法則の実演を通して空気の実在とその性質を学ぶ。

ロバート・ボイル (1627~1691 年、アイルランド) は、詳細な気体の研究を行い、理想気体の「ボイルの法則」を導いた (1662 年)。ボイルが発見したこの法則は、温度が一定の時、気体 (当時は空気) の体積が圧力に反比例することを示している。

$$pv = \text{一定} \quad (\text{ボイルの法則})$$

ここで、 p は空気の圧力、 v は容積である。空気は、何種類かの気体分子が集まった「混合気体」であり、現在では、この数式が示すこと理解することはそれほど難しくはない。しかし、ボイルがこの法則を発見した当時、空気の正体 (気体分子の存在) は分かっておらず、空気の「圧力」という概念はまだなく、「温度」という概念は、さらに 140 年も後になって定義される。圧力や温度といった基本的な概念が存在しない時代である。「温度一定の条件」も「圧力と体積が反比例する」ということも、温度や圧力が定義された現代であれば理解ができるが、この時代、こんな簡単な式でも、その内容を理解することは難しい。

ボイルの時代、空気は、目に見えない何かがそこにあるように感じられる不思議な存在である。世界には、まだ「科学」がなく、空気を知る方法は、錬金術や魔法や医術やそれらの道具としての「化学」があっただけである。科学の概念も科学的手法も確立していない時代に、ボイルは見えない空気を「科学的」に研究、近代の科学は、約 350 年前、17 世紀の英国に生まれた。



図 2-1-1-ロバート・ボイル (1627~1691 年)
Wikipedia

(1) マクデブルクの半球 (Magdeburger Halbkugeln, 英: Magdeburg hemispheres)

ボイルは、空気ポンプを使って空気の研究を始めたが、ボイルが、空気ポンプに興味を持つきっかけとなったのは、オットー・フォン・ゲーリケ (1602 年~1686 年、神聖ローマ帝国ハンブルク) が製作した真空ポンプである。

空気の研究の前に、真空の研究があった。

17 世紀まで、自然界の現象を理解する手法の主流は、「スコラ哲学的」な証明方法であった。古代ギリシアのアリストテレスやルネ・デカルト (1596~1650 年、フランス) が提唱した、「真空嫌悪説」もそのひとつである。自然は真空を嫌い、真空状態を作ることではできないということが「哲学的に証明」されていた。

ガリレオ・ガリレイの弟子エヴァンジェリスタ・トリチェリ (1608~1647 年、教皇国ファエンツァ) は、水銀とガラス管を用いて行った有名な実験「トリチェリの真空」によって真空を作り出してみせた (1643 年)。しかし、スコラ学派は、ガラス管には人が検知できないほど小さな穴があいており、そこから空気が入っているだけであり、真空は存在しないと否定した。トリチェリの実験では、水銀の重さによってガラス管の上部に真空状態が作られたというのが「科学的」な真実であるが、それを証明することは難しく、当時の人たちを納得させることはできなかった。

11 世紀に欧州で生まれたスコラ学は、宗教と哲学が結び付けられ、神学をはじめ、自然哲学、自然科学など様々な分野に応用されていたが、その手法・方法論は現在の科学とは大きく異なり、宗教的教義に束縛されるものであった。スコラ学を厳しく批判し、合理主義哲学の祖となったデカルトであるが、その方法論はスコラ学であり、真空嫌悪説を主張した。

ガリレオ・ガリレイとトリチェリによって、トリチェリの真空の実験が行われた時、水柱や水銀柱は、ある高さにまでしか登らないこと、その高さは日によって異なることが分かっていた。真空嫌悪説には一定の限度があると考えられた。ブレーズ・パスカル (1623~1662 年、フランス) は、山の頂上と麓でトリチェリの実験を行い、水銀柱の高さの違いを見出し (1648 年)、気圧の存在を研究した。

ゲーリケは、真空ポンプによって二つの半球の中の「空気」を抜き、そこに作り出された真空と大きな大気圧によって押さえつけられた二つの半球は、その両側を 16 頭の馬で引っ張っても離れないことを示した。有名なマクデブルクの半球実験 (1657 年) である。この実験によって、より具体的な形の真空が作り出され、「真空嫌悪説」が誤りであることが決定的となっていった。ゲーリケは、真空ポンプによって、それまで不可能と思われていた真空を実現し、空気が圧力を持つこと、大気圧の存在を証明し、半球が離れないのは周囲にある「空気」が圧力を

持つためであることを示した。

マクデブルク市は、現在のドイツのザクセン＝アンハルト州の州都。街は、三十年戦争中、神聖ローマ帝国軍とハンザ同盟都市マクデブルクの間で起こった「マクデブルクの戦い（1630年）」によって壊滅した。その後、市長となったゲーリケ（在任1646～1676年）によって市は復興を遂げたが、ゲーリケは、市長在任中に真空ポンプを製作して（1650年）この半球実験を行った。

また、ゲーリケは、真空を利用した気圧計を用いて天気の予想を行い、気象学のさきがけとなった。摩擦によって電気を起こす摩擦起電機を最初に発明したのもゲーリケである。

一方、ゲーリケは、このマクデブルクの半球実験を自らは公表せず、著書の中で公にしたのは20年も後のことである。しかし、イエズス会修道士のガスパール・ショット教授（1606～1660年、ヴュルツブルク）がその著書「流体力学」（1657年）の中でゲーリケの実験を紹介したため、欧州の人たちは、この実験のことを知ることであり、ボイルもそのひとりであった。なお、マクデブルクの半球は、現在でも中学理科で、真空と大気圧を学び、見えない空気を実感するための実験によく用いられており、市販品や教材の製作方法、実験の方法などについての情報も多い。

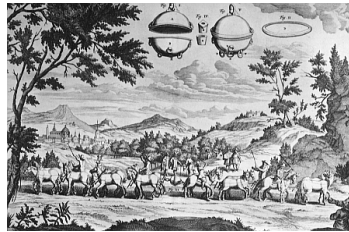


図2-1-2-マクデブルクの半球実験の様子と半球を描いた絵
出典：Wikipedia



図2-1-3-ルネ・デカルト
(1596～1650年)
出典：Wikipedia



図2-1-4-オットー・フォン・ゲーリケ
(1602年～1686年)
Wikipedia

(2) ボイルの法則の発見

真空の研究は、空気の研究へとつながり、中世の錬金術は近代の化学へと変わっていった。

ゲーリケの真空ポンプに興味を持ったボイルは、助手のロバート・フック（1635～1703年、イングランド）とともに空気ポンプを製作することにした。容器の中の空気を抜く真空ポンプは、すなわち空気を汲み出すポンプであり、彼らは、空

気ポンプを用いた空気の研究を始めた（1657年）。

ボイルは、水も空気も自由に形を変えることができるが、両者の大きな違いは、空気が「弾力性」を持つことであると主張、ポンプによって「圧力」をかけると空気が縮むことを実験によって確かめ、ボイルの法則を発見した（1662年）。ボイルは、空気の圧縮と膨張の実験を行い、空気の弾力度（圧力）と容積の関係を詳細に求め、「科学的」手法による検証を行ってボイルの法則を導いた。しかし、新発見の法則には、反論が付きものであり、当初、真空反対論者（真空嫌悪説を信じる学者）たちは、空気の弾力性があることや空気に重さがあることを認めなかった。当時は、科学が未発達であり、実験は誤りが多く信用されず、観念的思考が優先されるというのが普通である。ボイルが行った空気ポンプを用いた実験から現象を考察・説明するという手法は、まだ主流ではなかった。現在では、科学的に証明されるとそれは真実であるとされるが、当時は、まだ科学的（化学的）な方法論そのものが信用されていなかった。

補足 2-1：流体の圧縮性

ボイルは空気が圧縮できることを示したが、現在の科学や工学の取り扱いはやや異なる。

一般的な取り扱いとして、ボイルが示したように、液体は、ほぼ非圧縮性流体、気体は圧縮性流体とみなされているが、液体も高い圧力をかけると圧縮できるので厳密には「非圧縮性流体」というものは存在しない。一方、工学的（流体力学的）には、流体を「非圧縮性 (incompressibility)」と「圧縮性 (compressibility)」に区分する概念があり、流れの記述では、流体の圧縮性は、気体や液体の物性ではなく、マッハ数という無次元の相対速度で評価される。空気は気体であり圧縮性流体であるが、音速以下の流れは、非圧縮性流れとして取り扱われる。

現在、自然界の法則や現象を記述する最も標準的な手法は、実験結果を定量的、数学的に記述するという方法である。しかし、当時は、自然界を記述する方法には、哲学的な言葉で表現する方法と、数式によって記述する方法があり、後者の方法は、ボイルより100年前に生まれた音楽家ヴィンチェンツォ・ガリレイ（1520～1591年、イタリア）が、音程と弦の研究の中で始めたものである。

ヴィンチェンツォが広めたこの方法は、息子のガリレオ・ガリレイに引き継がれ、ガリレオに師事したボイルも、実験から得られる結果を数式で表現し、ボイルの法則として定式化された。現在では、自然界の法則を哲学的な言葉や観念で表わすことの方が少なく、多くの法則が数式で表現されるようになっているが、ボイルの法則は、数式で表わされた最も有名な物理法則のひとつである。

ボイルが空気の「弾力度」としたものは、現在、われわれが空気の「圧力」と呼んでいるものである。圧力は、空気の分子が容器の壁に衝突する結果として現われ、外から力を加えた場合は、その力と空気の圧力が釣り合うことによって圧力が定義できる。

ボイルは、空気には、金属のばねが持つような弾力という性質があると考えた。また、当初は、空気ポンプで圧縮した大気圧以上の空気（正圧の空気）と真空ポンプで引いた時の空気（負圧の空気）は別の物質であると考えられていたが、いずれの場合もボイルの法則が適用できることから、正圧の空気も負圧の空気も同じ物質（空気）であることが示された。

現在、われわれは、圧縮された空気も、大気圧そのままの空気も、真空ポンプで引いた残りの減圧空気も、いずれも圧力が異なるだけの同じ空気であることをよく知っている。注射器、真空調理器、ペットボトルなどを使った簡単な実験で、空気は確かに存在することや、ボイルの法則を理解することができる。しかし、ボイルがこの法則を発見した時、時代は、まだ科学が現われる前、錬金術の時代であり、見えない空気は非常に不思議な存在であり、現在は常識とされている空気の様々な性質も、ひとつずつ科学的な方法によって確認されていった。

ガスの科学は、その後、18世紀に現れた学者達によって大きく発展したが、ボイルの活動期は17世紀である。新たな発見があると、それをきっかけにして、同じ分野で続けざまに新たな発見が行われることが多いが、ボイルの場合は、あまりにも時代に先駆けていたため、時代はすぐには追いついてこなかった。

ボイルの法則が空気以外の他の気体にも適用されることが明らかにされたのは100年後のことであり、ボイルがすでに気付いていた空気の温度と体積の間に何か関係があるということが、科学的に明らかにされるのは、ジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサックが「絶対温度」の概念を提唱し、シャルルの法則として定式化した、140年後のことである。ボイルは「圧力」を発明したが、ゲイ＝リュサックによって「温度」が発明されるのは1世紀半も後のことである。

(3) 錬金術から化学へ

ボイルは、アイルランドに生まれ、1641年にイタリアに渡り、ガリレオ・ガリレイ（1564～1642年、フィレンツェ公国ピサ、）に師事した。ガリレオはその翌年に没しており、ガリレイ（当時77歳）とボイル（当時14歳）は、ほんのわずかの期間であるが、師弟関係にあった。日本の将棋界に現われた天才棋士、藤井聡太がプロになって無敗の29連勝の記録をたてたことが話題となった（2017年）が、

初めて対戦した相手、天才棋士、加藤一二三は 20 世紀生まれの 77 歳。藤井聡太は 21 世紀生まれの 14 歳。16 世紀生まれの天才ガリレオ・ガリレイと 17 世紀生まれの天才ロバート・ボイルの二人が出会ったときと全く同じ年齢である。ガリレオとボイルの時代や関係を想像するのはピンとこないかも知れないが、加藤一二三と藤井聡太と比較すると現代人にも何となく想像ができそうである。ボイルは、3 年後に大陸から英国（イングランド）に戻り、錬金術師（alchemist）となった。

原光雄著の「化学を築いた人々」には、先駆的化学者 14 人の評伝が非常に詳しく記されているが、ボイルは、その先頭に記される「最初の化学者」であり、「近代化学の父」と記されている（「化学を築いた人々」については、8 章で簡単に紹介する）。

世界には、古くから様々な錬金術（アルケミー、alchemy）があった。錬金術とは、卑金属を貴金属に変えようとする学問あるいは試みのことであり、特に金（きん）を作ろうとするものなので、日本語では錬金術と書く。古くは古代ギリシア錬金術、イスラム錬金術、インド錬金術、中国錬金術などがある。

錬金術は、現在の科学とは思想が異なり、魔法の世界の話である。当然、金という元素を合成できたという実例はないが、錬金術は、金属に限らず、様々な物質や生物までを対象としており、科学が生まれる前の、科学のようなものであって、一部の技術は科学の時代にまで続いている。紀元前 2 世紀にイスラム錬金術で発明されたアルコール蒸留器は「蒸留」の起源であり、現在の化学工学へとつながっている。中国の錬金術では火薬が発明された。

イスラム錬金術は、やがて欧州に伝わり、12 世紀からは西欧錬金術の時代となっていた。ボイルの時代は、17 世紀の欧州の科学革命の時代といわれるが、錬金術「魔法の世界」とまだ哲学の枠組みの中にあつた「科学の世界」は、その境界がはっきりとしていなかった。

ボイルの職業は、西欧錬金術の錬金術師であり、基本的には金属を変質させることができると信じて研究を行っていた。これは、ボイルの 15 年後に生まれたアイザック・ニュートンも同じで、ボイルを「最初の化学者」と呼ぶように、オカルト（超自然的）研究に熱心であつたニュートンを「最後の錬金術師」と呼ぶこともある。現在では、ボイルを化学者、ニュートンを物理学者としているが、これは、後世の人が彼らの業績をみてそのように呼んでいるだけで、実際は、多くの学者が錬金術師である。

スコラ哲学に反対し「近代哲学の父」と称せられるデカルトが、スコラ哲学の方法論を用いたように、錬金術を過去のものとして「近代化学の父」と称せられるボイルも錬金術が出発点である。錬金術師であるボイルは、錬金術そのもの（金属の

変換)は信じていたが、先人から伝わる知識の先入観には惑わされないという信念も持っており、現在の言葉でいえば、物理、化学、生理学といった様々な分野で「科学的」実験を行った。ボイルの行った研究やその手法は、それまでの錬金術を大きく変え、錬金術や医学の道具であった化学的手法を「化学」という学問に変えていった。科学者は錬金術師の中から生まれた。

ボイルは、著書「懐疑的化学者(原題"*The Sceptical Chymist: or Chymico-Physical Doubts & Paradoxes*")”(1661年)の中で「元素仮説」を提唱した。多くの書物がラテン語で書かれた時代に英語で書かれたこの本の表題には、"CHYMIST"とあり、これはおそらく後の"chemist"であり、日本語では「化学者」と訳されている。

元素説には、古代ギリシアから伝わるアリストテレスの四元素説(火・水・空気・土の四元素)や16世紀のパラケルススの三元素説(水銀・硫黄・塩の三原質)があり、万物は火によって「元素」(element)に分解されると考えられていた。しかし、ボイルは、これらの思素中心の仮説を否定し、実験を重視して元素を探すべきと主張し、元素が粒子であるという粒子仮説を唱えた。

ボイルは、水や鉄や石のような塊は、目に見えない粒子がたくさん集まって作られていると考え、元素とは、物質を分解していった時に究極に得られるものであるという仮説のもとに、実験を行った。また、ボイルは、この時、既に、混合物と化合物、単体と化合物も区別して考えていたが、古い元素説を打ち破ることはできず、元素が原子や分子から構成されるという原子・分子の概念は、18世紀以降の科学によって明らかにされていた。

ボイルは、物質の基本構成要素として元素が存在するという立場をとった「最初の化学者(chemist)」であり、著書の中で次のように述べている。「これまで、化学(chemistry)は、錬金術(alchemy)や医術のための道具であって、自然科学(natural philosophy)の探求が目的ではなかった。そのため、非常に多くの見落としがあった。自分は化学的手法を哲学的目的に用いたいと思うようになった」。

ボイルが目指した「純粋自然科学」(pure science)は、周囲からは、空気の重さばかりをはかっている実用性のないものだと批判されることが多かった。しかし、その後の科学の発展をみると、魔法の研究よりも科学の研究の方が実用的であり、その批判は間違いであったことが分かる。

近代の科学は、ボイルによる気体の研究と新たな元素説から始まり、自然科学

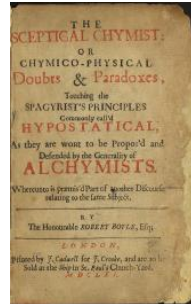


図 2-1-5- 「懐疑的化学者」の表紙 (1661年)
(Wikipedia)

(natural philosophy) は、18 世紀になって「物理学 (physics)」と呼ばれるようになった。本来、物理学は、自然科学全てを含む幅広い学問であるが、19 世紀以降は、特に物理現象のみを追求するようになり、生物学や化学などとは分けて考えられるようになった。

補足 2-2：ボイルが発見した、水の膨張

ボイルは、ボイルの法則の発見の他にも多くの業績を残している。液体の比重と光の屈折の関係、結晶や電気、色の研究などを行った。今では常識となっている空気が音を伝播すること（真空ポンプで空気を抜くと音が伝わらない）、燃焼には空気が必要であること（真空中では物が燃えない）、水が凍結する際の膨張力など、数々の重要な発見がボイルによって行われた。当たり前だと思われる様々な現象も、最初は、誰かが発見している。

ここでボイルが発見した凍結する水の膨張を現代の科学で考えてみる。図 2-1-6 に水の密度と温度の関係を示す。水は非常に不思議な性質をもった物質であり、現在も重要な物性研究の対象物のひとつである。

（水の不思議な物性のリストは、→「2.2.5.3 地球 46 億年の歴史と空気の起源(3)水の歴史」)

水の密度の最大値 (999.97kg/m^3) はよく知られるように 4°C (3.98°C) のところにあり、それよりも温度が低いと温度の低下とともに密度が減少する。固化する（氷になる）と密度が極端に低下、固体の氷（密度 916.8kg/m^3 、 0°C ）は、液体の水（密度 999.8kg/m^3 、 0°C ）に浮く。

これは、固体の結晶に多くの隙間があるためで、このような液体密度が固体の密度がよりも大きい物質を異常液体と呼ぶ。異常液体の物性を示すいくつかの元素が知られており、ケイ素、ゲルマニウム、ガリウム、ビスマスの液体は固体よりも重い。身近な化合物では、水だけがこのような特殊な性質を持ち、水（液体）は氷（固体）より重い。水と氷があまりにも身近な存在であるため、不思議に感じる事が少ないが、ほとんどの物質では、液体は固体より軽く水は例外である。液体の水分子の周りには、約 4.4 個の水分子があり、固体の水の分子の周りには 4 個の水分子

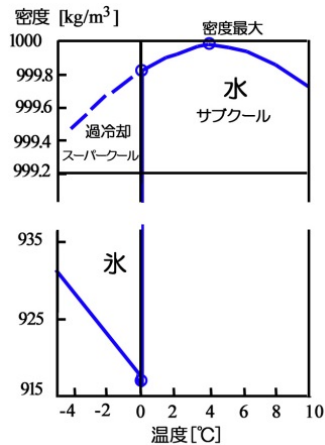


図 2-1-6-水の密度と温度の関係

が存在するため、水と氷の密度比は、およそ 11 : 10 となり、水の方が氷より重い。液体の密度が温度に対して極大値を持つというのも水の大きな特徴である。4℃（密度の最大点）の水が 0℃（融点）の氷になる時、その中間の温度、0~4℃の水の中には、氷と同じ構造が徐々に現われる。この間の水は完全な液体ではなく、そのため、通常物質であれば、温度の低下とともに大きくなる液体の密度が逆に小さくなっている。

もし他の物質と同じように、水も固体（氷）の方が液体（水）より重く、液体の密度にも極大値がなかったとすると、自然界や生態系は全く異なっていたはずである。

もし水が普通の液体であったならば、冬季に気温が 0℃以下となり、湖や河川の水面が凍り始めるとその氷は下に沈む。水面はずっと凝固点 0℃のまま凍り続け、やがて水全体が凍り、水の中の生物の細胞は凍結し破壊され越冬できる領域がない。しかし実際の河川の水は、凍結する前の冷却過程で、最も重い 4℃の水が先に底に沈む。底には、氷より重く温かい水が残り、底まで全部が凍るということが起こりにくい。水の底には、生物が越冬可能な液体の水がある。

岩石に染み込んだ水は、凍る時に体積が増え、岩石を破砕、風化が進み地表には土壌が現われ、地上には植物が現れる。水の不思議な性質が地球の不思議な自然を作り出している。

水は、最も身近に存在する物質であるが、同時に非常に特殊な物性を持つ物質であり、今も多くの水の研究がある。なお、氷には 17 種類もの結晶構造が発見されており、超高压下では非常に重い氷が存在する。

(3) ロバート・フック (Robert Hooke, 1635~1703 年)

ロバート・ボイルの助手であったロバート・フックは、弾性に関する法則「フックの法則」がよく知られるが、その業績に比べると科学史における記録が極端に少ない学者である。フックは、アイザック・ニュートンと激しく対立、ニュートンが英国王立協会で権力を得た後、フックの業績を抹消してしまったため、多くの記録が失われたためである。近年になってフックに関する資料の発掘・調査研究が行われるようになり、日本では、中島秀人氏（1956 年～、東京工業大学）によるフックの研究がある。中島氏の著書「ロバート・フック ニュートンに消された男」（1996 年）や科学史研究者による研究から、新たなフック像が知られるようになってきた。

ボイルは、ゲーリケと同じ真空ポンプの製作をロンドンの実験器具製造業者に依頼したが、技術的難度が高く、全く機能しなかった。その時、ボイルの助手とな

っていたフックが、これを改良してうまく稼動するように完成させた。真空ポンプの製作は難しく、17世紀にまともに稼動できた真空ポンプは、ゲーリケのポンプとフックのポンプだけとされており、欧州の学者達は、フックが製作した「ボイルのポンプ」を手本にして研究を行っていった。

真空と空気の研究が始められた当時、これらの機械を用いる研究は、莫大な製作費を投じる「17世紀の巨大科学」であった。現在の感覚からは、空気ポンプや真空ポンプを巨大科学と考えることは難しいかも知れないが、現在では、小さなパーソナル・コンピュータやロボットの人工知能の中に納まっている機能も、わずか半世紀前は、専用の空調を持つビルに設置された巨大な箱・電子計算機であり、思い出すのも難しくなっている。350年も前の真空ポンプや空気ポンプも、おそらく今からは想像できないほど大掛かりな機械であったと思われる。

フックは、ボイルのために真空ポンプと空気ポンプを製作、彼らは空気の弾性の研究を始めた。当時は、気体の圧力という概念がなく、ポンプによって圧縮された空気が、弾性によって縮む現象として研究された。ボイルは、空気が弾性を持つことを示したが、フックの機械工作に関する知見や高度な技術がなければ、ポンプは製作できず、空気の研究は進まず、ボイルの法則も発見されなかったはずである。

フックは、顕微鏡を製作、顕微鏡で観測した小さな階層を詳述、「ミクログラフィア (Micrographia)」という歴史に残る書物を著した(1665年)。まだ写真が発明される前の時代、天才的な絵画の才能を持つフックは、微小な世界を詳細に描写し、後世の科学者に多大な影響を与えた。同書の名称は日本語でも「顕微鏡図譜」とされるが、ここには、顕微鏡による微小な世界だけでなく、物理(力学)や天文学(月面の詳細な様子)など、当時の最先端の「科学」が広範に記述された。

中島氏は、ミクログラフィアの記述から、フックが、ボイルよりも先にボイルの法則を発見していたのではないかと推察、フックは実験装置の製作だけでなく、実験の精度も優れており、また数学の才能もあったので、実

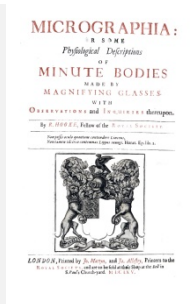


図 2-1-7-ミクログラフィアの表紙(1665年)
(Wikipedia)



図 2-1-8-フックの顕微鏡
(Wikipedia)

際の実験データから法則を定式化してボイルの法則を導いた真の発見者はフックであったのではないかと述べている。

ボイルが、最初に空気の弾性を記述したのは、「空気の弾性とその効果についての自然学的・機械学的新実験」(1660年)である。これはボイルが甥へ宛てた手紙の形式をとった本であったが、改訂版では、他の学説への反論が付録として追加され、ここにボイルの法則が記述された(1662年)。これに対してフックのミクログラフィアは微小な世界から天文学まで極めて広範な分野を詳述しており、その執筆にはかなりの時間を要したと思われ、出版されたのは、フックがボイルから独立した後(1665年)である。(フックがボイルの助手を務めたのは、1655~1662年までの7年間)

フックは、建築家としても知られ、イングランドのペストの大流行が沈静化した直後に起こったロンドン大火の後に、ロンドンの測量官となり、消失したロンドンの新しい都市計画を行った(1666年)。フックは、機械技術に精通し、真空ポンプや空気ポンプだけでなく、ぜんまい時計、望遠鏡、顕微鏡、光学機器のためのレンズ研磨装置など様々な機械を考案し製作した。グreshamカレッジでは数学の教授であり、医学博士でもある。

フックは、製作した長大な望遠鏡を用いて、火星や木星の自転を観察、惑星の動きから、重力が距離の逆2乗の法則に従うことを見出した(1666年)。フックは、当時できたばかりの英国王立協会の定例会でも、慣性の法則、万有引力の法則、天体の円軌道や楕円軌道などの講義を行った(1670年)。

イタリアには、15世紀に生まれ、建築、美術、科学など様々な分野で活躍した二人の天才、ミケランジェロ・ブオナローティとレオナルド・ダ・ヴィンチがいて、人々は彼らを万能人と称えたが、ロバート・フックを、「万能人 17世紀のミケランジェロ」、「イングランドのレオナルド」と評する学者もいる。フックは、建築、美術、科学(生物、天文学、力学、光学、化学)、工学(天体望遠鏡、顕微鏡、時計の開発)、数々の分野で活躍したが、ミケランジェロやダ・ヴィンチほど名前が残っていない。

真実は、どうであれ、今からボイルの法則がフックの法則と書き換えられることも、万有引力の法則や慣性の法則がフックの法則になることもないだろうが、ボイルの法則というのは、このような時代にロバート・フックとロバート・ボイルによって発見された、最初の気体の法則であり、この簡潔な式の中には、非常に重要な科学の歴史が見えてくる。

補足 2-3：王立協会 (Royal Society)

ロバート・ボイル (1627~1691 年) とロバート・フック (1635~1703 年) が活躍した頃、欧州は 17 世紀科学革命 (第一次科学の制度化) の時代である。

彼らは、ロンドンに「王立協会」を設立した。最古の学会は、ローマのアッカデーミア・デイ・リンチェイ (山猫学会、1602 年) であるが、現存する最古の学会は、ロンドンに創立された王立協会 (Royal Society)、正式名称は「自然科学の発展に寄与するロンドン王立協会 (学会)」である。

同時期に設立された自然科学の学会は 3 つ、フレンツェ実験学会 (1657 年)、王立協会 (1660 年)、パリ科学アカデミー (1666 年) であり、の中で、王立協会だけが民間団体であり、他の 2 つはいわゆる政府機関である。王立協会はその名称から、国や国王が設立・運営している政府機関のように思われるが、国王チャールズ 2 世が設立を許可したというだけで、それ以上は国家が関与しない自然科学に関する民間の任意団体である。

ボイルとフックが生まれた頃、英国は、激動と争乱の時代である。王権神授説によって権力をふるったジェームズ 1 世、チャールズ 1 世の時代、イングランド、スコットランド、アイルランドを舞台に大きな内戦が起こった (1642 年)。宗教対立の形式をとった内戦は、オリバー・クロムウェル率いる清教徒派 (議会派) が王党派に勝利し、クロムウェルによる独裁体制、護国卿時代となった (ピューリタン革命、清教徒革命)。しかし、クロムウェルの死去によって革命が終焉に向かい、復権したチャールズ 2 世がオランダから帰国し、王政復古が成った (1660 年)。

同じ年の 11 月、ボイルらが中心となって、実験哲学の育成を目的としたアカデミー設立計画が動き出し、チャールズ 2 世から勅許状が与えられ (1662 年)、「自然知識を促進するためのロンドン王立協会」が正式に発足した。

1645 年頃のイングランドでは、議会派が占拠するロンドンを避けて王党派が遷都した首都オックスフォードには、「科学者」が集まり、「オックスフォード実験哲学サークル」のようなサークルができていた。これは、ボイル (当時 18 歳) によれば「インビジブル・カレッジ (見えざる大学)」と呼ばれる団体のひとつである。インビジブル・カレッジは、常設の物理的なキャンパスという枠を越えた学問愛好家の繋がり (ソーシャル・ネットワーク) である。王政復古によりロンドンにも人が集まるようになり、いくつかあったインビジブル・カレッジの中から正式な団体としてロンドンの王立協会が誕生した。

王立協会は、「権威に頼らず、また権威に干渉されることなく、実験・観測事実をもって近代自然科学を構築すること」を目的として設立された。

自然哲学が、国家や宗教の権威によって数々の干渉を受け、正しい道程を歩んでこなかったという歴史的な教訓から、王立協会は、権威への依存、権威からの干渉を排除して科学を構築することを設立の目的とした。国王の詔勅を受けた王立協会は、出版が国家や宗教によって支配されていた時代に、イングランド国教会の許可なしに、自由に出版を許される特別な団体となった。

グレシャムの法則「悪貨は良貨を駆逐する」で知られるトーマス・グレシャム(1519～1579年、イングランド)の遺言によってロンドンのグレシャム邸内に、グレシャム・カレッジが設立された(1597年)。王立協会はこのを拠点として活動した。

グレシャム・カレッジは、中世のスコラ学から学問を開放することを目的としており、学問が一部の人のものであった時代に、一般の人々にも開かれた学問の場を提供し、入学資格も授業料も必要としなかった。したがって、授業は、学問の基本であるラテン語だけでなく英語でも行うことが義務付けられており、できる限り実用的であることも求められた。たとえば、初代の幾何学教授ヘンリー・ブリッグスは、スコットランドの数学者ジョン・ネイピアの業績(自然対数)を引き継いで、対数の底を10とする常用対数(ブリッグスの対数)を提案し、対数表や三角関数表などを出版し、数学から得られる知識や技術が実社会にも役立つようにした。

西欧に起源がある「大学」という教育機関には、12～13世紀に始まる「ユニバーシティ」(university、日本語では「総合大学」)、様々な意味で用いられる高等教育機関である「カレッジ」(college、日本語では「単科大学」「専門学校」などと訳される)、工業系の単科大学を表わすインスティテュート(Institute of Technology、日本語では工業大学や工科大学)などがある。イングランドには、この時すでに「オックスフォード・ユニバーシティ(11世紀末創立)」と「ケンブリッジ・ユニバーシティ(13世紀初頭創立)」が存在していた。これらのユニバーシティはデパートメント(学科)とカレッジで構成される特徴的なカレッジ制を敷く「総合大学」であり、イングランドにおける高等教育の権威である。

オックスフォードやケンブリッジにおけるカレッジは「学寮」の位置づけであるが、ロンドンに作られたグレシャム・カレッジは、ユニバーシティには含まれない独立した学校であり、現代の単科大学に近い教育・研究機関であった。ただし単科ではなく、天文学、神学、幾何学、法律、音楽、修辞学、医学(physic、現在のphysics 物理学も含む)の教授を置いている。現代の感覚からすると、純粋に理科系の学校ではないが、科学や実学に重点をおいているようにみえる。

グレシャム・カレッジを活動拠点とした王立協会もカレッジと同様、開かれた組

織と科学的知識の共有を目指していたため、ボイルやフックの書籍も英語で書かれた。授業や出版がラテン語で行われるユニバーシティとは大きく異なる点である。時は、まだ錬金術の時代であったが、グreshamカレッジに間借りして設立された王立協会は、開かれた教育・研究を目指し、科学の時代を切り開いていった。

王立協会の設立時、ボイル（33歳）は初代の会長（president）に選挙されたがこれを辞退、研究に集中することにした。助手であるフックは若過ぎた（25歳）ため設立メンバーにも名前を連ねなかった。しかし、ロバート・ボイルとロバート・フックは王立協会の中心メンバーであり、実質的には、彼らが王立協会を発展させていった。

この当時の「科学」とは、貴族が趣味でおこなうもの、あるいは錬金術師が仕事の合間に行うものであり、いわゆるアマチュア（素人あるいは愛好家）のものであった。ボイルは、能力的には素人ではないが、貴族であり錬金術師であり、周囲からは化学愛好家とされていた。フックは、数少ない例外のひとりであり、おそらく史上最も古い科学を本業とする職業科学者（プロフェッショナル）である。フックは、王立協会の定期的な会合で、様々な物理、化学、生物学、生理学の講演や実験の実演を行い、グreshamカレッジの教授となってからは、終生、カレッジ内に居住を許された特別な科学者となった。

17世紀初頭から中期にかけて、イタリア、フランス、イングランドなどには、王立協会のような学会が設立され、学会誌の発刊が行われるようになり、科学は「一人前の大人が行うに値するもの」との認識が広まり「科学の制度化」が行われた。

王立協会の歴代の会長には、主に爵位を持つ政治家、軍人などが選ばれたが、学者では12代目アイザック・ニュートン、22代目ハンフリー・デービー（バロネット卿）、35代目ウィリアム・トムソン（ケルビン卿）、38代目ジョン・ウィリアム・ストラット（3代目レイリー卿）、43代目アーネスト・ラザフォード（ネルソン卿）などが会長を務めている。

補足2-4：アイザック・ニュートン

アイザック・ニュートンは、ボイルより15歳、フックより8歳若く、ボイル同様、17世紀のイングランドの錬金術師である。ロンドン王立協会はオクスフォードの学者が多かったが、ニュートンは主にケンブリッジを中心に活動、26歳の時にケンブリッジ大学の名誉ある地位であるルーカス教授職につき、29歳の時に、ボイルやフックと同じ王立協会の会員に選出された。

ニュートンは「光の粒子説」を提唱した。20世紀の科学の解釈では、光は波と粒子の二つの性質を持つ光量子であるが、それまでは、波動説優勢の時期とと粒子

説優勢の時期が交互に訪れている。この当時は、多くの現象が、クリスティーン・ホイヘンスによる「光の波動説」によって説明されていたため、多くの学者が波動説を支持、ニュートンの粒子説は実験と理論の両面から劣勢であった。波動説を主張するフックは、ニュートンを厳しく批判、両者は激しく対立するようになった。

ニュートンは「自然哲学の数学的諸原理(プリンキピア)」を王立協会に提出(1687年、44歳)した。当初、財政的な問題もあって出版ができなかったが、天文学者エドモンド・ハレー(1656~1742年、イングランド)が、ニュートンを説得、ハレー自らが資金援助を行ってプリンキピアを自費出版させた。プリンキピアには、慣性の法則や万有引力の法則が記述されたが、ニュートンは、(重力の法則の発見者はフックであるが)万有引力を数式にしたのは自分であると主張し、フックと万有引力の先取権をめぐり激しく争った。

ロバート・フックの存命期間は、1635~1703年、アイザック・ニュートンは1643年~1727年である。ニュートンは、フックが亡くなると直ぐに王立協会の会長に就任(1703年)、フックに関する多くの記録を抹消した。ニュートンは、グreshamカレッジからクレーンコートへの王立協会の移転を強行し(1710年)、フックの痕跡を記録だけでなく物理的にも抹消しようとした。フックが製作した貴重な実験装置は全て失われ、著した論文の多くが行方不明となった。写真のない時代、著名人は肖像画によって記録されることが多く、王立協会の設立・活動に多大な貢献をしたフックの肖像もそれまではグreshamカレッジに飾られていたが、ニュートンが焼き捨てたため、フックはこれほどの偉人でありながら、その肖像は未だに不明のままである。その後、わずかに残ったフックを記録する伝記類には、フックは人間性に相当大きな問題があり、非常に性格の悪い人物であったと評文されるようになった。

世の中には、科学や技術をめぐる論争や紛争は少なくないが、ここまでの人間的な確執は極めて珍しい。しかし権勢を振るったニュートンといえどもフックの痕跡を完全には消すことはできず、出版されたミクログラフィアは残り、ボイルが行った実験など様々な実験結果は残った。20世紀になってから、行方不明となっていたフックの資料が徐々に発掘されるようになり、フックの実像を見直す科学史の研究も行われている。フックは大きく見直されるようになり、調査の結果、フックの性格はそれまでの記録とは全く正反対であったことなどが示されている。フックの記録が抹消されただけでなく、事実の歪曲があったのかも知れない。

天才は、人間関係の問題を抱えることが多いが、ニュートンが関わった紛争はとくに有名である。ニュートンは、感情的な軋轢からフックの抹消を図ったが、そのほかに、二件の有名な紛争が知られている。

ニュートンは、微積分をめぐる、ゴットフリート・ライプニッツ（1646～1716年、神聖ローマ帝国ライプツィヒ）と争った。ライプニッツは「極大と極小に関する新しい方法」（1684年）で微分法を発表、「深遠な幾何学」（1686年）で積分法を発表した。ニュートンはプリンキピア（1687年）の中で微積分を発表した。

発表は、ライプニッツの方が早いため、当初はニュートンによる盗作が疑われた。しかし、先取権に関する審査を行ったのは英国王立協会である。王立協会は、逆に発表前のニュートンのアイデアがライプニッツに盗まれたとしたため、紛争となり、その後、イングランドと欧州の科学界の間には険悪な関係が続いた。

微積分の考え方自体は、ライプニッツやニュートンよりも古い時代から知られており、現在では、ライプニッツとニュートンは、それぞれ独自に微積分学を確立したのではないかと考えられているが、今日、われわれが知っている数学の記法はライプニッツの記法である。

プリンキピア発行の翌年、1688年、イングランドに名誉革命（無血革命）が起こった。イングランドをカトリック国にしようとしたジェームズ2世は追放され、新たにプロテスタントの国王・女王（夫妻共同統治）が迎えられたが、名誉革命への貢献が高く評価されたニュートンはケンブリッジの有名人となり、新たな議会の国会議員となり、造幣局にも職を得た。

1699年には、造幣局長になったため、ケンブリッジからロンドンに移り住み、1703年には王立協会の会長となり、1705年にはナイトの称号を得た（科学者として初の爵位）。ニュートン主義と呼ばれる科学の体系は、革命で混乱していたイングランドの社会を支える基本思想として高く評価されていった。ニュートンは、それまでの王立協会の会長が数年で交代していた時に24年という極めて長い期間、会長職に君臨した。

ニュートンによるフックの抹消、ライプニッツとの紛争は、プリンキピアの発行をきっかけに、このような時代背景の下に起こった事件である。

ニュートンのもうひとつの有名な事件、フラムスティードの事件もプリンキピアに端を発している。ニュートンは、プリンキピアを執筆する時に、イングランド王室天文官（天文学者）であるジョン・フラムスティード（1646～1719年、イングランド）から観測データを入手した。しかし、当時のニュートンの力学では、月や太陽の複雑な運動を記述することができなかった。そこで、ニュートンは、自分の理論に合わないデータを排除するために、論文からフラムスティードの名前を抹消した。

過去に彗星の発見をめぐる両者が対立、ニュートンが自説を取り下げたという経緯があり、ニュートンは、フラムスティードに感情的確執を持ち、論文からフラ

ムステードの名前を消すだけでなく、数々の嫌がらせを行った。ニュートンは、フラムステードが天体の観測記録である「天球図譜」を出版しようとしたのを差し止め、逆にフラムステードの古い不正確な観測記録が、ハレーとニュートンによって王立協会から出版された(1712年)。フラムステードは、勝手に自分の記録が利用されたことに抗議して提訴、裁判に勝訴した結果、ハレーとニュートンによる王立協会版の天球図譜は焼き捨てられた。フラムステードは、王立協会版の天球図譜を図書館などから可能な限り探し出して回収・焼却し、ニュートンは、プリンキピアの改訂版で引用文献などからフラムステードの名前を抹消した。グリニッジ天文台の初代天文台長フラムステードと王立協会会長のニュートンの間は完全に決裂した。フラムステードは、天球図譜を出版できないまま亡くなってしまい(1719年)、翌年、ハレーがグリニッジ天文台長に就任、正しい天球図譜は出版されることはなかった。

しかし、ニュートンが亡くなると(1727年)、すぐにフラムステードの遺族は、協力者を得て正しい天球図譜「Atlas Coelestis」を出版した(1729年)。これは、当時の世界最高の星図となり、その後の航海や測量の基礎となった。そこに記されたグリニッジ天文台は、測量と天文の基準点となり、その後、世界の標準時(グリニッジ標準時、Greenwich Mean Time, GMT)となった。なお、現在の世界の時間(時刻系)には、「協定世界時 UTC」が使用されているが、通信分野では現在も GMT が同義に用いられている。

ニュートンは、ケンブリッジ大学教授、議員、造幣局長、サーの称号、英国王立協会会長など科学と俗世に大きな地位と権力を得て英国の名士となったが、一方では、フックとフラムステードを抹消、ライブニッツと紛争を起こした。欧州では、ニュートンの研究手法やオカルト研究、人物の評判は非常に悪かったが、その後に関われた解析力学(ラグランジェ力学とハミルトン力学)によってニュートン力学は、数学的に洗練され、再公式化され、19世紀には非常に高い評価を得るようになった。やがて、ニュートンの業績は美化され、伝説的天才科学者としての虚像が作られた。

現在もニュートンを天才的物理学者、偉人として尊敬し信じる人も多く、真実は、歴史研究者でなければ分からないが、フック、フラムステード、ライブニッツの事件を知るだけでも不安である。われわれはニュートンの論文の原文やその他の資料にほとんど触れることがないが、20世紀になって、科学史研究者や経済学者によって、失われたフックの記録やニュートンの研究が行われるようになってきた。美談や脚色ではない錬金術師、造幣局長、オカルト研究者、権力者としてのニュートンの本当の人物像が研究されるようになった。アインシュタインは、最も尊敬す

る科学者として、アイザック・ニュートン、マイケル・ファラデー、ジェームズ・マクスウェルの3人を挙げていたといわれるが、ニュートンが研究され、その史実や評価が見直されるようになったのは、アインシュタインも晩年、1930年頃からである。その結果、明らかになってきたニュートンの実像は、それまでの人がよく知っている偉人ニュートンとは、あまりにもかけ離れている。

2. 1. 1. 2 シャルルとゲイ=リュサック

(Jacques Alexandre Césaire Charles、 Joseph Louis Gay-Lussac)

(1) ボイル=シャルルの法則 (Combined gas law)

ジャック・シャルル (1746～ 1823 年、フランス) は、「気体の圧力が一定の時、気体の体積は温度に比例する」という「シャルルの法則」を見出した (1787 年)。しかし、シャルルは、この発見を自らは公表せず、それから 15 年も後になって、ジョセフ・ルイ・ゲイ=リュサック (1778～1850 年、フランス) がこれを定式化して発表した (1802 年) ため、この法則は、「シャルルの法則」とも「ゲイ=リュサックの第二法則」とも呼ばれる。

気体の温度、圧力、容積の関係を示す「状態方程式」は、前述のボイルの法則とシャルルの法則を合わせて、次のように、ひとつの式で示されることが多い。

$pV = \text{一定}$	ボイルの法則
$V/T = \text{一定}$	シャルルの法則
$pV = nRT$	ボイル=シャルルの法則 (日本語での通称)

ここで、 p は圧力、 V は容積、 R はモル気体定数、 n は気体のモル数、 T は温度である。

法則の中には、ボイルとシャルルの二人の名前があるが、ボイルとシャルルは、全く異なる時代を生きており、シャルルの法則がゲイ=リュサックによって発表されたのは、ボイルの法則から 140 年も後のことである。

また、ボイルの法則とシャルルの法則は、全く別の法則である。異なる二つの法則をまとめてひとつの式 (理想気体の状態方程式) として書き記しているだけであり、ボイル=シャルルの法則という名前の法則がある訳ではない。日本語では「ボイル=シャルルの法則」と呼ぶが、英語では、Boyle's law と Charles's law あるいは Boyle's law と Gay-Lussac's law を合わせた "Combined gas law" である。日本語のボイル=シャルルの法則は、二つの気体の法則を統合して表わす言葉として、広く用いられているので、ここでは、このままこの言葉を用いることにするが、ボイルの法則とシャルルの法則は、理想気体であることを除いて、無関係であることは、忘れないようにしたい。上式の「ボイル=シャルルの法則」は、ボイルの法則+シャルルの法則+アヴォガドロの法則を合わせた、統合された理想気体の法則と呼ぶのが正しく、「ボイル=シャルルの法則」という名前の法則は存在しない、

シャルルは、異なる気体を風船に詰め、その温度を上げたとき、どの風船も同じ体積に膨らむことを発見、気体の体積は、温度に比例するという関係を見出した(1787年)。

しかし、当時は、まだ「温度」という物理量の概念は、確立されておらず、寒暖を表示する温度計も発展途上、温度目盛もばらばらであった。ゲイ=リュサックはシャルルの法則を定式化する時に、「絶対温度」という概念を作りだし、容積は温度に比例するとした(1802年)。したがって、ボイルの法則は、「気体の温度が一定の時、圧力と容積が反比例する」と説明されることがあるが、実際にはボイルの法則が発見された時には温度という概念はまだなく、当然のことながら、温度が一定という条件もなかった。

ボイル=シャルルの法則は、「理想気体 (ideal gas) の法則」である。理想気体とは、「気体分子には大きさがなく、気体分子と気体分子の間には力が働かない」という架空の気体である。この仮定は全く事実に反しており、このような気体は実際には存在しない。

したがって、ボイル=シャルルの法則は、実際の気体の挙動を正しく

表わしていない。しかし、実在する気体でも、条件によっては、理想気体に近く、ボイル=シャルルの法則が、近似的に成り立つことがあることが分かっている。そのため、現在でも、実在気体の部分法則として理想気体の法則が用いられることがある。また、実在する気体の挙動は、極めて複雑で厳密な記述が難しいため、その後に見られる実在気体を表す状態方程式の多くが、理想気体の状態方程式を基本として、これを補正・補完する形式で表現されている。理想気体は実在しない架空の気体のモデルではあるが、理想気体の概念や理想気体の法則は、ガスの科学の出発点として非常に重要である。

室温、大気圧付近の空気は、理想気体に近い挙動を示すため、空気の体積と圧力、温度の関係を実際の生活の中で体感することができる。

身近な例として自動車のタイヤと風船を考える。いずれも中に空気(気体)が閉じ込められている。空気の充填を止めて、バルブや栓を閉じると、中の空気が外の空気と出入りできない状態になり、「閉じた系(closed system、熱は出入りでき



図 2-1-9-ジャック・シャルル (1746~1823年) Wikipedia



図 2-1-10-ジョセフ・ルイ・ゲイ=リュサック (1778~1850年) Wikipedia

るが物質は出入りできない系)」となる。見ることはできないが、中には空気（の分子）が詰まっているはずである。

空気を充填したとき、タイヤはあまり変形しないが、風船は大きく形が変わるところが異なる。タイヤの中の空気は、容積一定の条件となり、風船の中の空気は圧力一定の条件となり、観察されるタイヤや風船の挙動（中の空気の挙動）が、ボイル＝シャルルの法則で説明できる。

容積が変化しないタイヤでは、中の空気の温度が上がると圧力（空気圧）が上昇する。たとえば、自動車用タイヤが、気温 20℃で走行前の空気圧が 200kPa（ゲージ圧）であったとすると、時速 100km でしばらく走行した後では、内部の空気の温度がおよそ 50℃になり、空気圧は 220～230kPa（ゲージ圧）となる。この時、温度は、293K から 323K に上昇し、それに比例して中の圧力が上昇する（絶対圧として約 300kPa から 330kPa に上昇）ということが、シャルルの法則によって説明される。

走行後は、空気の温度（タイヤの温度）が変化するため、測定される圧力が大きく異なり、この例では、10%以上も異なる値（ゲージ圧力）を示している。内部の空気の量は変わらないが、温度の上昇によって圧力は大きく変わる。通常の使用では、タイヤ内部の空気の温度を計って、充填圧力を一定条件に換算するということはしないので、自動車メーカーでは、タイヤの指定空気圧（空気圧の安全上適正な値）をほぼ同じ条件で測定した場合、すなわち冷間時の値としている。気圧や気温による違いはあるものの、ほぼ条件が揃う走行前に空気圧の点検を行って、その値が安全上適性であるかということを確認するということである。日常生活の中でも、閉じ込められた気体は、温度によって容易にその圧力が変わるということに注意を払う必要がある。

なお、製造直後のタイヤは、使用開始時に構造材がこなれることによって骨格が大きくなるため、内部の容積が大きくなる。タイヤは、風船のように何度も大きくなったり小さくなったりはしないが、新品タイヤだけは、膨張するため、漏洩が全くないとしても、空気圧は 10%ほども低下する。新品タイヤを使用する場合初期の慣らし運転と点検が必要とされているが、その理由には、機械的な慣らし、運転者の感覚の慣れ、初期の漏れの確認の他にこのような「タイヤの成長」による膨張と圧力低下が必ず起こるためである。

温度上昇による圧力上昇は、シャルルの法則から、変形・膨張による圧力低下はボイルの法則から理解される。

一方、大きく変形する風船では、タイヤの場合とは異なり、圧力がほぼ等しいまま容積が増えて膨らむ。温度が上がると風船の中の圧力と風船の張力が、外の気圧（大気圧）と釣り合うように膨らむ。風船の中の空気の温度だけを上げる実験

は簡単ではないが、氷水で風船を冷やして中の空気の温度を下げると風船が縮むので、シャルルの法則を観察することができる。タイヤや風船の中の空気の挙動は、ボイル＝シャルルの法則によって説明ができる。

高圧ガスの機器では、気密が保たれている（漏洩がない）ことが非常に重要であるが、それを確認する気密試験の方法のひとつに、ガスを充填して長時間放置して圧力変化をみる方法（加圧放置法）がある。たとえば、深冷空気分離装置（内部には蒸留塔や熱交換器などの高圧ガスの機器が多数ある）に乾燥ガス（窒素ガスや空気）を充填して、ガスの漏れがないことを確認する場合、温度の変化による影響が大きいため、圧力の測定と同時に温度を正しく測定しておかなければならない。気温の上昇によって内部の圧力が上昇するため、長時間の放置で圧力が低下しない場合でも、温度変化を考慮しないと、漏洩の有無がはっきりしないからである（大量に漏洩していない場合は、シャルルの法則で補正）。

ただし、このような気密試験は、比較的大まかな検査方法であり、実際には、溶接部や接続部などの重要箇所に対して、より詳細な漏れ試験である、漏洩検査液（石鹸水など）、ヘリウム・リーク・ディテクタ（ヘリウム吹き付け）、あるいはX線などを用いた検査が行われている。

なお、産業ガスを充填する容器（シリンダー、通称ボンベ）には、通常 15MPa ほどの圧力の気体が充填されているが、高圧の気体であるため、理想気体からは大きく外れている。

なお、ボイルの法則の時に弾性とされた性質は、気体分子の圧力として理解されるようになり、温度についても、気体分子の運動がない状態を「絶対零度」とする「絶対温度」の概念が与えられたが、この時、まだ「分子」という概念は確立していない。

（→「2.2.1.2 温度の尺度と温度の単位ケルビン」）

（2）空気の研究

ボイルの法則とシャルルの法則で、理想気体はほぼ理解されたといえるが、実験室や風船の中の空気だけでなく、大気の一部である空気の研究についても触れておきたい。

いまだに、「高地に行くと酸素が薄い」という大間違いをする人が後を絶たないが、空気が薄いことを酸素が薄いと言い間違えることは、簡単な間違いだと思っではいけない。標高が高くなると、空気の圧力は低下するが、酸素の濃度は地上とは変わらない、という事実は、空気を研究した先人たちの命懸けの観測によって得られた結果である。

シャルルとゲイ=リュサックは、いずれも、有人気球の開発とそれを利用した研究が知られている。17世紀の科学革命は、ボイル、フック、ニュートンなどイングランドやアイルランドなど英国の科学者が中心であったが、ガス気球のパイオニアであるシャルルと、熱気球のパイオニアであるゲイ=リュサックは、フランス人である。

シャルルは、ガス気球（浮揚ガスは主に水素）を設計・製作し、研究のために自ら搭乗した。シャルルは、気球に充填する水素を化学反応によって発生させたが、鉄と硫酸から水素が作られる反応は発熱反応であるため、発生直後の水素の温度は高く、これを充填した気球は一旦膨らむが、温度の低下とともにしぼむということが繰り返された。当初は、発生した水素の冷却装置がなかったため温度の高い水素をそのまま充填すると、温度の低下とともに気球は縮んでしまい、充填作業には苦労した。現在では、気体の充填効率を上げるために、充填前に気体を冷やす装置、プレ・クーラーやインター・クーラーを利用するということが考えられるが、その時はまだ、気体の容積と温度の関係は法則としては理解されていなかった。水素の温度が下がると気球が縮むという現象は、まさにシャルルの法則から説明ができる。

一方、ゲイ=リュサックは、熱気球を製作、ジャン=バティスト・ピオ（1774～1862年、フランス）と5000mの高空まで昇り、上空の空気をサンプリングして温度や湿度の観測を行った（1804年）。ピオは、磁場に関するピオ・サバルの法則で知られるが、科学の分野で様々な発見をしている。有機物の旋光から「光学異性体」の存在を提唱し、後にピオの指導を受けたパスツールがこれを実証した。「隕石宇宙起源説」を提唱し、隕石が地球外から来たものであることをつきとめ、太陽系や地球の成り立ちを研究する科学の礎となった。ピオは、空気の研究のためにゲイ=リュサックと気球の冒険に出た。また、アレクサンダー・フォン・フンボルト（1769～1859年、プロイセン王国）も、ゲイ=リュサックとともに、空気の研究を行い、次の二つの重要な発見をした（1805年）。

「高度が高くなると気圧が低下する」

「上空でも空気の組成は変わらない」（酸素は薄くならない）

今では、当たり前のことが、210年前の科学の大冒険によって明らかにされたのである。フンボルトは、南米アマソンの探検や著書「コスモス」が知られる近代地理学の祖である。数々の大冒険とともに、火山、気象、暴風雨、地磁気、生物

学などの分野においてその業績が知られ、ドイツでは最も名前が知られる学者・探検家である。日本でも、フンボルト海流やフンボルトペンギンなど、探検家フンボルトに因む名前がよく知られている。現在、ドイツのノーベル財団とも呼ばれる「アレクサンダー・フォン・フンボルト財団」から優れた研究者に「フンボルト賞」が贈られている。

当時、バスカルによる、山の麓と頂で行われたトリチェリの実験から、高度によって気圧が異なることは分かっていた。しかし、もっと上空には、空気があるのか、もし空気があったとしても、そこに含まれる酸素の濃度はどうなっているのか、フンボルトとゲイ=リュサックが発見するまで、誰も分かっていない。まだアルゴンは、発見されていないので、空気は窒素と酸素という二つの元素からなると理解されていたが、その空気に同じ割合で酸素が含まれているかどうかは、誰も確認したことがないのである。既に真空ポンプや脱酸素空気によって、空気の中に含まれる酸素が薄ければ、動物は生きていけないことが実験から分かっていたので、気球で空に昇るということは、大変危険な科学実験であった。

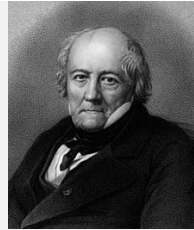


図 2-1-11-ジャン=バティスト・ピオ (1774 ~1862年) Wikipedia



図 2-1-12-アレクサンダー・フォン・フンボルト (1769~1859年) Wikipedia

(3) 空気の研究と気球

「真空の研究」→「空気の研究」→「気体の研究」→「気球の開発と冒険」と科学者たちの探求が繋がって、ガスの科学、物質の研究が進んだ。

今から350年前、ボイルとフックは、実験室で空気ポンプを使った実験を行ってボイルの法則を発見したが、210年前のシャルルとゲイ=リュサックは、実験室から外に出て、上空の空気に興味を抱き、水素気球や熱気球を膨らませて、数々の発見をした。高度が高くなると気圧が下がり、空気が減り空気が薄くなるが、その組成は変わらず、酸素は濃くも薄くもならないということが200年前の大冒険・実験によって明らかとなった。図は、Wikipediaに掲載される、ゲイ=リュサックの熱気球とシャルルの水素気球の様子を描いた絵である。写真が実用化されるのは、1830年代以降であるから、シャルルやゲイ=リュサック、フンボルトの時代までは、著名人の肖像画はあるが、写真はまだない。気球の様子も画家が描いた

絵である。

実用的な熱気球 (Montgolfière、英 hot air balloon) を発明したのは、ジョゼフ＝ミシェル・モンゴルフィエ (1740～1810 年、フランス) とジャック＝エティエンヌ・モンゴルフィエ (1745～1799 年、フランス) のモンゴルフィエ兄弟である。

ジョゼフは、物が燃えた時の煙の中には何かものを浮かばせる成分が含まれていると考え (1777 年)、絹の織物でそれを囲うことによって浮き上がる気球を発明した。

ラボアジエが「燃焼とは物質と気体が結合すること」と説明したのは 1777 年。この時、燃焼という化学反応は、まだよく理解されておらず、暖められた空気が周囲の空気よりも軽くなるということもまだ分かっていない。モンゴルフィエ兄弟は、何か燃えると浮力を生む煙が発生すると考え、これを集めて利用する気球を製作した。

モンゴルフィエ兄弟は、数々の実験を行ったが、上空で酸素が薄くなっていないことを確かめるために動物実験が行われた。アヒルや鳩では、もともと空を飛ぶため、空気の組成の影響を受けないかも知れないと思われ、空を飛ばないニワトリや羊のような動物が選ばれた。安全を確認するための実験が行われ、実験動物が無事に帰還することが確認された。

無人飛行による性能確認、動物の飛行による安全性確認、続いて有人飛行が決定されるという、この時に彼らがとった手順は、その後の宇宙開発でも全く同様である。

1783 年、高さ 22m、直径 15m ほどの熱気球が製作され、ついに人類史上初の有人飛行が行われた。搭乗したのは製作者ではなくフランスの軍人二人である。現在のような耐熱性の高い素材で球皮 (エンベロープ) が作られ、LPG を燃料とする安全な熱気球が開発されるのは 1960 年代になってからである。当時の熱気球は、布と魚網を用い、薪や石炭を燃料とする非常に危険な乗り物であった。熱気球は、開発した兄弟の名前をとって、「モンゴルフィエール」と呼ばれる。

一方、シャルルのもとで、アン＝ジャン・ロベール (1758～1820 年、フランス) とニコラ＝レイ・ロベール (1760～1820 年) のロベール兄弟が、水素を浮揚ガスとするガス気球を製作、ガス気



図 2-1-13-ゲイ＝リュサックとビオの熱気球 (1804 年)
Wikipedia



図 2-1-14-シャルルの水素気球、
Wikipedia

球による初の有人飛行は、熱気球の初の有人飛行からわずか 10 日後に行われた。水素気球のために、絹の気嚢にゴムを含浸させた軽量で気密性の高い機体が製作され、気球を用いた研究のために、気圧計や温度計が開発され、気象観測が行われた。ガス気球は開発を指揮したシャルルの名前から「シャルリエール」と呼ばれる。当時の熱気球は飛行のたびに火災で球皮が痛みむのに対して、ガス気球は繰り返し使用が可能であったためガス気球の方が優勢となっていた。ガス気球の浮揚ガスには、水素や石炭ガスのような可燃性ガスが用いられた。

水素は、ヘンリー・キャヴェンディッシュ (1731~1810 年、イングランド) によって発見され (1766 年)、金属と塩酸や硝酸を用いて発生させる方法が示されており、シャルルも硫酸と鉄くずを用いて水素を発生させ、鉛管を用いて気球に水素を充填していた。水素は、空気よりも 10 分の 1 ほどの重さしかないと見だされており、シャルルはこの軽い気体で気球を浮揚させることを思いついた。

キャヴェンディッシュは、18 世紀を代表する化学者のひとりであり、様々な化学的発見をしている。水素の発見、水素と酸素からの水の合成 (ただしフロギストン説に基づいているため現在の化学の解釈とは異なる) などがよく知られるが、キャヴェンディッシュによる多くの発見や研究が未公開のままであったため、クーロンの法則、オームの法則、空気に含まれる酸素と窒素以外の元素 (アルゴン) の示唆など、多くの発見のオリジナルが、実はキャヴェンディッシュによるものであったということが、後の研究から判明している。19 世紀になってキャヴェンディッシュを記念して設立されたキャヴェンディッシュ研究所 (ケンブリッジ大学) は、世界的な物理学の研究所となり、数多くの著名な研究者を輩出している。ガスに関わる人物としては、レイリー卿、ラザフォード、カピッツァなどの研究者がいる。近年は、物理だけではなく、化学やたんばく質の研究、DNA の構造の発見など分子生物学などの貢献でも知られる。

気球は、空気の研究、物質の研究に重要な役割を果たし、科学観測、軍事、商用に利用されていった。飛行船は、19 世紀半ばに実用化され、19 世紀末からは硬式飛行船が商用、軍用の輸送に広まった。多くの飛行船が浮揚気体に水素を用いていたが、ヒンデンブルク号事故 (米ニュージャージー州、1933 年) 以降、衰退し、航空機の発達に伴って輸送用の乗り物としては利用されなくなっていった。世界大戦では、航空機の侵入を妨害するために数多くの気球 (阻塞気球、空に浮かぶ機雷のような役割) が製造され、安全性よりも、むしろ引火しやすいようにと水素ガスが使用された。

現在の気球の主な利用方法は、レジャー (熱気球競技)、アドバルーン (ガス気球)、浮揚ガスにヘリウムを使用する小型の飛行船 (広告用) などである。

高層大気の観測・研究のために、水素やヘリウムが充填された高高度気球（High-altitude balloon）が利用されている。高高度気球の到達最高高度の気圧は、地上の100分の1から1000分の1しかないため、極めて特殊な構成となっており、以前の最高記録51.8kmを達成したNASAの気球（1972年）は容積150万 m^3 （一般的な熱気球の容積は2000 m^3 程度）、球として計算すると直径142m。JAXAが高度53.7kmの世界記録を更新した高高度気球（2013年）は、容積8万 m^3 、直径60mと非常に大きな風船である。また気囊の材料は特殊で、JAXAのものでは厚さは2.8 μm しかない。一回の実験で、放球から破壊落下までの飛行時間は数時間、成層圏におけるオゾン層の観測や二酸化窒素の測定などが行われている。

高高度気球は気象観測、天体観測、低重力研究などに利用され、欧米では、高高度からのアースウォッチング（ガス気球による高高度からの地球撮影）がホビーとして存在する。日本の国内は航空法など様々な規制があり、誰でも簡単に風船を飛ばすという訳にはいかない。

2. 1. 1. 3 ジョン・ドルトンとアメデオ・アヴォガドロ

(John Dalton, Conte Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregna e Cerreto)

(1) ドルトンの法則と原子説

ボイルが示したように、気体の研究は「元素」や「分子」の概念と結びつけて行われてきた。ジョン・ドルトン(1766～1844年、イングランド)は、水素、酸素、二酸化炭素などの気体を用いた実験から、「分圧」という概念を導入して、混合気体の圧力が各成分の分圧の和に等しいとする「ドルトンの法則(Dalton's Law)」を見出した(1801年)。前述の原光雄著「化学を築いた人々」では、ボイル、ブリーストリー、ラヴォアジエに続いて4人目の化学者としてドルトンが紹介されている。



図2-1-15-ジョン・ドルトン
(1766～1844年)
Wikipedia

ドルトンの法則は、日本の高校の化学の教科書にも出てくる有名な法則で、「定温定圧の条件で、複数種類の理想気体を混合して混合気体をつくるとき、①混合気体の占める体積は混合前に各気体が占めていた体積の和に等しく②混合気体の圧力(全圧)は、各気体の分圧の和に等しい」とする「理想気体の混合気体」の法則である。

ドルトンの法則は、「分圧の法則」として知られているが、この法則の主張の中には、「分体積の法則」と「分圧の法則」という二つの法則が含まれており、前半①は、「アマガールの分体積の法則」、後半②が「ドルトンの分圧の法則」である。二つの法則は等価と考えられているため、合わせてドルトンの法則と説明されることが多いが、分体積と分圧は、それぞれ異なる概念である。

液体と液体を混合すると混合液体の容積は、元の液体の容積を合計したものにならないが、気体の場合は、ほぼ合計した容積になると考えられ、これをアマガールの法則(Amagat's law)と呼ぶ。たとえば、 10cm^3 の水と 10cm^3 のエタノールを室温で混ぜると 19.3cm^3 の混合溶液となり 20cm^3 にはならないが、理想気体である 10cm^3 の酸素と理想気体である 10cm^3 の窒素を混ぜると 20cm^3 の理想気体の混合気体になり、分体積の合計が混合気体の体積に等しくなる。液体の場合、 $1+1$ は 2 にならないが、気体の場合は、 $1+1=2$ になると考えるのが、理想気体の混合気体の概念である。

これに、ボイルの法則を適用すると、混合気体の圧力(全圧)は、元の気体の圧力(分圧)の合計に等しいことが分かる。したがって、アマガールの法則とドルトンの法則は等価とみることができ、分体積の法則=分圧の法則=ドルトンの法則

と考えることもできる。

容積 V_A 、 V_B の気体 A、B を混合し、混合気体の容積が V 、混合気体の圧力が P になったとすると、理想気体と理想混合気体の間では次の関係が成り立つ。

$$V = V_A + V_B \quad \text{アマガールの法則}$$

$$PV_A = P_A V \quad \text{ボイルの法則}$$

$$PV_B = P_B V \quad \text{ボイルの法則}$$

これから

$$P = P_A + P_B \quad \text{ドルトンの法則}$$

が導かれる。

ここで、分圧 P_A 、 P_B は、混合気体の容積 V になるように各成分を個別に膨張させたときに各気体が示す圧力であり、分体積 V_A 、 V_B は、混合後の圧力 P になるように各成分の圧力を調節したときの各気体が示す体積である。

2行目と3行目の式は、混合する前の気体を、予め出来上がりの体積に膨張させたとしてボイルの法則を適用し、分圧を求めたものである。混ざってしまうと元の圧力との関係が分からないため、予め別々に膨張させて圧力を求めるという手法であるため、実際の混合ガスの圧力とは異なる。

理想気体を混合した理想混合気体は、一般の混合液体のように交じり合うことがなく、異なる気体の間にも同じように相互作用がないと考えると、アマガールの法則とボイルの法則から、ドルトンの法則が導かれる。ただし、アマガールの法則はドルトンの法則よりもかなり後になって、アマガール (Emile Hilarie Amagat, 1841～1915年) が実在気体の研究をする中で見出した (1880年) ものであり、分体積の概念は方が後から作られており、基本的には、ドルトンの法則 (分圧の概念) である。

いずれにしても、分圧と分体積は、実際に存在するものではなく、仮想の体積、仮想の圧力であることに注意が必要である。しばしば、分圧というものが実際に存在するかのような議論がなされることがあるが、これは、あくまでもそういう概念の圧力を考えるということであって、実際の混合ガスの中に分圧というものが存在する訳ではない。

ドルトンは、気体は小さな粒子のようなものからできており、それらが占める体積や圧力は、それぞれの量によって分配されるものと考えてドルトンの法則を導いた。ボイルの法則からシャルルの法則まで、目に見えない空気や気体には、何となく気体分子のようなものが含まれていると考えられてきたが、ドルトンは、よりはっきりと「微小な粒子」を考え、次のような「原子分子仮説」を提唱した。

- ①全ての物質は、それ以上分割できない原子からなる
- ②第一原子は、単体の究極の粒子である（現在の原子に相当）
- ③第二原子は、複合原子であり、第一原子が結合してできている（現在の分子に相当）
- ④同じ種類の原子は、全て同じ大きさ、形状、重さを持っている（原子量の概念）
- ⑤同じ種類の分子は、全て同じ大きさ、形状、重さを持っている（分子量の概念）

古代ギリシア時代から続いた物質の探求は、元素という概念によって発達してきたが、ドルトンの原子説によって、「全ての物質が小さな粒からなる」という概念が、本格的に導入されることになった。

近代になって分子、原子、素粒子など、小さな粒子に物質の根源を求める本格的な科学が発達するが、理論や研究ツールが整えられ、これらの微小粒子が実際に発見されるようになるのは、まだ先、19世紀後半から20世紀にかけてである。19世紀初頭、ドルトンは、原子よりも小さな粒子までは、想定していなかったため、ドルトンの原子分子仮説は、現代の科学とは相容れない部分も多い。また、その後、発見される同位体の存在によって原子量や分子量の概念も変わってしまい、ドルトンの原子分子仮説では説明できないことも多い。しかし、ドルトンが提唱した基本的な概念は、当時の科学に重要な進歩を与え、元素（物質）が、原子（第一原子）と分子（第二原子）という「小さな粒」からできているという考えは、現代の科学にもつながっている。

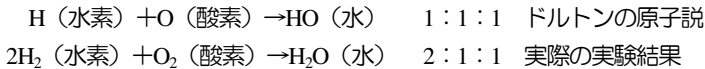
なお、ドルトンは、実在する気体は理想気体とは異なる振る舞いをするだろうと考え、原子説の中では、全ての流体が液化されるであろうと予言している。当時はまだ気体の液化は実現されていなかったが、ドルトンの法則から60年後の1861年、ドルトンが家庭教師として教えたジュールが、実在気体の液化に大きな進歩をもたらすジュール＝トムソン効果を発見する（「2.1.2.2 ジュールとウィリアム・トムソン」の項参照）。

(2) アヴォガドロの法則

ドルトンの法則に続いて、ゲイ＝リュサックが、気体反応の法則（ゲイ＝リュサックの第一法則）を提唱し（1808年）、「反応で生成される、あるいは失われる各気体の体積の間には簡単な整数比が成り立つ」ことを示した。

ドルトンの原子分子説は、多くの実験結果を説明することができたが、ゲイ＝リュサックが示した気体の反応の法則とは矛盾する結果を示した。ドルトンの原子分子説では、「一種類の元素からなる気体は、原子によって構成される」と考えられ、水素や酸素は一種類の元素からなるため、分子ではなく単原子で存在すると考えられていたためである。ドルトンの原子説で気体の反応、水素と酸素から水（第2原子）を合成する反応を考えると、（水素1分子）+（酸素1分子）→（水1分子）となるが、実際の実験結果は、（水素2分子）+（酸素1分子）→（水2分子）となった。

現在の分子式の書式に従うと、ドルトンの原子説と実際の実験結果は次のようになり、この反応を正しく説明することができなかった。



アメデオ・アヴォガドロ（1776～1856年、イタリア・サルデーニャ王国）が「アヴォガドロの分子説」を提唱し、「同じ温度、圧力の下、全ての気体は同じ体積中に同数の分子を含む」というアヴォガドロの法則（1811年）を見出した。

アヴォガドロは、ゲイ＝リュサックの気体反応の法則を定式化し、ドルトンの原子説の矛盾を解決することに成功した。

アヴォガドロの説は、

- ① 同じ量の気体は、同じ体積を占める
- ② 気体は原子ではなく、同種の原子が2つ結合した分子からなる

というものである。

現在では、よく知られているように、水素分子や酸素分子は、単原子ではなく、複数の同じ原子からなっており、2 : 1 : 1となる前述の反応は、アヴォガドロの分子説によって説明することができた。

一方、アヴォガドロの法則以降、気体の原子は、単独では存在しないということ



図2-1-16-アメデオ・アヴォガドロ
(1776～1856年)
Wikipedia

が化学の常識となったため、19世紀末に、空気の中からアルゴンが発見された時は、化合物を作らないアルゴン原子の存在（単原子分子）は常識外れであり、発見者のひとりラムゼーは、アルゴン化合物の合成、発見に苦勞することになる。（アルゴンの発見は、第3章で解説）

ボイルの法則（1662年）、シャルルの法則（1787年）、ドルトンの法則（1801年）、アヴォガドロの法則（1811年）と続き、19世紀初頭に理想気体の科学が確立した。理想気体の研究から、原子や分子に関する概念が生まれ、物質の科学が大きく発展することになった。

理想気体（ideal gas）とは、熱力学的には「圧力が温度と体積の逆数に比例し、内部エネルギーが温度に比例する気体」であり、統計力学的には「気体分子の体積と分子間の相互作用を無視できる系」である。理想気体の研究によって、科学は大きく発展し、理想気体は、非常に重要なガスの科学の基本となった。

しかし、理想気体は架空のモデルであり、ほとんどの実験事実は理想気体が存在しないことを示している。理想気体の概念から考え出された「気体分子」には大きさがなく、気体分子と気体分子の間には力が働かない、したがって、このような分子は液体にはならない。しかし、「実在気体（real gas）」と呼ばれる実際の気体では、分子には「大きさ」があり、分子間には相互作用があるため、液化することができる。

補足 2-5：アヴォガドロ定数（Avogadro constant） N_A

アヴォガドロ定数は、昔は、アヴォガドロ数（Avogadro's number）と呼ばれた。アヴォガドロ数は、「同圧力、同温度、同体積の全ての種類の気体には同じ数の分子が含まれる」というアヴォガドロの法則に由来する無次元数である。

IUPAC 総会でアヴォガドロ数はアヴォガドロ定数へと名称と定義が変更され（1969年）、1モルの原子、分子などに含まれる物質の数を表す「物理定数」となり、無次元ではなく、単位は、 $[\text{mol}^{-1}]$ である。1960年代までに教育を受けた人の多くが、アヴォガドロ定数ではなくアヴォガドロ数（あるいはアボガドロ数）として記憶している。

国際科学会議・科学技術データ委員会が推奨するアヴォガドロ定数の値は、 $N_A = 6.022140857(74) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ である。

アヴォガドロ定数がどのくらいの数字であるのかを教える授業に、コップの水を海の水で薄めるという計算例（思考実験）がある。

180 cm^3 のコップの水（180g）には、10モルの水分子が含まれる。地球の海の水は、14億 km^3 あるので、これを $1.4 \times 10^9 \times (10^3 \text{m})^3$ の真水とすると質量は、 $1.4 \times$

10^{18} トンとなり、海には、 7.8×10^{22} モルの水分子があると計算される。

コップ一杯の水を地球上の全海水で薄めると元の水の濃度は $10 \div 7.8 \times 10^{22} = 1.28 \times 10^{-22}$ となる。この薄まった水をもう一度コップ一杯、10 モル分集めると、このコップの中にある元の水の分子数を数えることができる。濃度に 10 モルを掛けて、アヴォガドロ定数を掛けると、807 個になる。

コップ一杯の水を海に撒き、これが地球全体に一樣に薄めた後に、もう一度水をくみなおすと、そのコップの中には元のコップにあった水の分子が 800 個も戻ってくるという計算になる。 6×10^{23} という数字はとてつもなく大きな数字でありことが分かる。 10^{-22} という濃度は 1ppt の 1ppt の 1 万分の 1 であり、非常に薄いですが、それでもコップ一杯の水の中の分子の数はこんなに多い。これは、思考実験であって、全ての海水が有限の時間のうちに、均一に混ぜることは不可能である。しかし、コップ一杯の水を全ての海水で薄めてもなお、800 個もの数の分子があるということは、それだけ多くの分子に囲まれているということであり、いくら高純度のものを作っても、100% という純粋なものとは得られない（証明することができない）ということでもある。

逆に海がどのくらい大きいかということを考えるために、100 万トン (10^6 トン) の液体（超大型の石油タンカー ULCC の 2 隻分の液体）を全ての海水で薄めたとする。原油の流出事故による汚染は、周辺海域・陸域に甚大な被害をもたらすが、もし全ての海でこれを希釈できたとすると、この量は、不純物として 1ppt になる。

1 モルに含まれる分子の数は非常に大きいですが、海も非常に大きく、そこに含まれる水分子の数は膨大である。

ここまで、ボイルの法則、シャルルの法則、ドルトンの法則、アヴォガドロの法則などを思い出して、重要な理想気体の科学を復習した。しかし、産業ガスの技術とビジネスを考える時、空気やその他の気体を理想気体として取り扱うことはできない。

- ① 産業ガスのビジネスでは、取り扱うガスを理想気体とみなせる範囲は、非常に狭い。
- ② 高圧の気体は理想気体から大きく外れている。産業ガスは高圧ガスビジネス。
- ③ 低温の気体は理想気体から大きく外れている。低温の気体はガス屋にとって必須の科学。
- ④ 理想気体は、理想的な気体であって液体にはならない。気体の液化はガス屋にとって必須の技術。
- ⑤ 一時期、言葉として存在した「永久ガス」は存在しない。ガス屋にとって非凝縮性ガスというものは存在しない。

小学校、中学校、高校では、17世紀の科学ボイルの法則、18世紀のシャルルの法則、19世紀のドルトンの法則、アヴォガドロの法則を学ぶ。偉大な先人たちの科学の成果も現在では、初等・中等教育で学ぶことができる。しかし、理想気体は近似的なものであり、これらの法則は、より基本的な法則の部分法則にしか過ぎない。重要な科学の入口ではあるが、現実の自然界の現象を正しく説明していないため、実際に使える場面はかなり限定される。室温・低圧の空気をほぼ理想気体として取り扱うことが可能な分野もあるが、気体を圧縮し、液化することを日常的に行う産業ガスビジネスの現場には、理想気体がない。

したがって、ボイル＝シャルルの法則やドルトンの法則、アヴォガドロの法則までで止まっていたら、ガスを取り扱うことはできない。産業ガスのビジネスは20世紀以降の科学を基礎としている。さらに、事業が、電子機器やその材料ガスに関わり、超低温、宇宙開発や同位体などの商材を取り扱うようになってからは、19世紀までの古典的な物理学では、全く用が足りなくなっている。もう一歩前に進んで20世紀以降の科学を知らなければ、ガス屋は務まらないのである。

表 2-1-1-理想気体と空気の研究（17世紀から19世紀初頭までの主な年表）

年	できごと
1564年	ガリレオ・ガリレイ生誕
1602年	オットー・フォン・ゲーリケ生誕
1608年	エヴァンジェリスタ・トリチェリ生誕
1623年	ブレーズ・パスカル生誕
1627年	ロバート・ボイル生誕
1635年	ロバート・フック生誕
1642年	ガリレオ・ガリレイ没
1643年	トリチェリの真空
1643年	アイザック・ニュートン生誕
1646年	ゴットフリート・ライブニッツ生誕、ジョン・フラムステード生誕
1648年	パスカル、気圧の存在を確認（山の麓と頂でトリチェリの実験）
1650年	ゲーリケ、真空ポンプを製作
1654年	マクデブルクの半球実験（最初の公開実験）
1655年	フックがボイルの助手に雇われる
1656年	エドモンド・ハレー生誕
1657年	ガスパール・ショットが『流体力学』にゲーリケの真空ポンプを記述 ボイルとフックが空気の研究を開始。フックがポンプの製作に着手
1658年	英国護国卿オリヴァー・クロムウェル没、清教徒革命が終焉にむかう
1660年	イングランド王チャールズ2世が帰国、王政復古となる。（5月） ロンドン王立協会がグreshamカレッジに設立された（11月）
1660年	ボイル、『空気の弾性とその効果についての自然学的・機械学的新実験』
1661年	ボイル、『懐疑的化学者』、錬金術から化学へ
1662年	ボイル、『空気の弾性・・・改訂版』にボイルの法則を記述。フック、独立。

1665年	ロンドンでペスト流行。フック、『ミクログラフィア』を出版
1666年	ロンドン大火、王立協会が一時移転。フックがロンドンの復興計画
1666年	フック、重力が距離の逆2乗の法則に従うことを発見
1670年	フック、慣性の法則、万有引力の法則、天体の円軌道、楕円軌道を王立協会で説明
1672年	ニュートン、光の粒子説を発表
1675年	グリニッジ天文台建設、フラムステードが初代天文台長（王室天文官）
1684年	ライブニッツ、『極大と極小に関する新しい方法』、微分法を発表
1686年	ライブニッツ、『深遠な幾何学』、積分法を発表
1686年	ハレー、気圧と海拔高度の関係を示す。大気の運動は太陽熱によることを説明
1687年	ニュートン、『自然哲学の数学的諸原理、プリンキピア』を発表。 万有引力、微積分、天球図譜に関わる紛争が起こる。
1688年	イングランドに名誉革命
1691年	ボイル没
1699年	ニュートン、イングランド王立造幣局長に就任しロンドンへ。
1703年	フック没。ニュートンが王立協会会長に就任
1710年	ニュートン、王立協会の移転を強行。フックの論文、実験装置、肖像画が消失。
1712年	ニュートンとハレー、王立協会版『天球図譜』を無許可出版。裁判で敗訴。
1713年	ニュートン、『プリンキピア第二版』を出版、フラムステードを抹消
1716年	ライブニッツ没
1717年	ニュートン、金銀のニュートン比価とニュートン兌換率を制定
1719年	フラムステード没、ハレーがグリニッジ天文台長に就任
1724年	ファーレンハイト、温度目盛を提案
1727年	ニュートン没
1729年	フラムステードの遺族、正しい『天球図譜』を出版
1736年	ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ生誕
1766年	ジョン・ドルトン生誕、アメデオ・アヴォガドロ生誕
1783年	モンゴルフィエ兄弟が製作した熱気球が有人飛行、11月22日 ロベール兄弟/シャルルが製作した水素気球が有人飛行、12月1日
1787年	シャルルの風船の実験（シャルルの法則）
1788年	ルイ・ラグランジュの『解析力学』、ニュートン力学を再定式化、洗練化。
1801年	ドルトン、「ドルトンの法則」、原子分子説
1802年	ゲイ＝リュサックの第二法則。シャルルの法則の定式化。絶対温度を定義。 理想気体の法則が完成
1805年	ゲイ＝リュサックとファンボルト、「高空の空気の組成は地上と等しいことを発見 ウィリアム・ローワン・ハミルトン生誕
1808年	ゲイ＝リュサックの第一法則（気体反応の法則）。ドルトンの法則と矛盾
1811年	アヴォガドロ「アヴォガドロの法則」、アヴォガドロの分子説がドルトンの法則を補完
1833年	ハミルトンがニュートン力学を再公式化、ハミルトン力学を構築
1851年	グリニッジ天文台本館に子午環が設置される

2. 1. 2 気体の液化

2. 1. 2. 1 マイケル・ファラデー (Michael Faraday)

マイケル・ファラデー (1791~1867 年、イングランド) は、電磁場の基礎理論を確立したことで知られる 19 世紀初頭の物理学者である。SI 単位における静電容量の単位「ファラッド (F)」と物理定数である「ファラデー定数 (F 、1 モルの電荷)」に名前を残している。

ファラデーは、学校教育を受けていなかったが、ハンフリー・デービー (1778~1829 年、イングランド) の助手となり、数々の結果を残した。電磁誘導の法則や反磁性を発見、電磁誘導を利用した電動機 (電気モーター) や発電機を発明した。前述の原光雄著「化学を築いた人々」14 名の中に、デービーの名前はあるが、ファラデーの名前はない。アルゴンを発見したラムゼーの名前はあるが、もうひとりの発見者レイリーの名前もなく、これはファラデーやレイリーが物理学者としての名声が高いためではないだろうか。

しかし、ファラデーは物理学だけでなく、化学や電気化学の分野でも数々の業績を残している。

人工のガスを医療用に用いる研究を目的として、イングランドのプリストルに「医学的気体研究所」が設立され、デービーが実験を指揮した。研究所では、ジョゼフ・プリーストリーが合成した「フロギストン化窒素ガス」が製造され、これを定期的に吸引していたデービーや友人のジェームズ・ワットらがガス中毒になっていたといわれている。現在、このガスは「笑気ガス」、すなわち他の麻酔薬と併用する麻酔補助薬 (亜酸化窒素、 N_2O と医療用酸素による笑気麻酔ガス) として実用化されており、産業ガスの商材 (医療ガス) のひとつになっている。

当時は、目に見えない気体 (様々な種類の「空気」) には、医学的効能があると考えられており、医学的気体研究所では実験的な研究が行われ、デービーも自ら水性ガス (CO を含む有毒ガス) などを吸引、非常に危険な実験も行われていた。

デービーは、天才的な化学者として名声を得ていたが、デービーの実験助手を務めていたファラデーも優秀な科学者として高い評価を得るようになってきた。これを快く思わなかったデービーは、ファラデーの研究を妨害、デービーの存命中ファラデーは、電磁気学などの物理学の研究ができなくなってしまった。デービーは準貴族となり、王立協会の会長にも就任 (1820 年)、平民であり 13 歳年下の



図 2-1-17-マイケル・ファラデー (1791~1867 年) (Wikipedia)

実験助手ファラデーを対等な科学者として扱うことはなかった。しかし、物理学の研究を封印されたファラデーは、この間に化学者として数々の業績を残し、デービーの化学の成果を継承・発展させた。

化学分野のファラデーは、電気分解の法則を発見、酸化数の概念を体系化し、電極やイオンの概念を導入、ベンゼンを発見した。ファラデーが行った、同じ物質でも大きさが異なると性質が異なるというコロイドの研究は、現在の金ナノ粒子であり、ナノテクノロジーに通じる考えを見出している。

ファラデーは、「液体と気体は同じ物質からなる」、「気体とは、沸点の低い液体の蒸気である」という概念を確立した。現在では、液体の水と気体の水蒸気は、いずれも同じ水の分子の異なる状態であると理解されているが、これを最初に提唱したのはファラデーである。

ファラデーは、気体の液化に取り組み、デービーが発見した新元素、塩素ガスの液化に成功（1832年）、続いて、亜硫酸ガス、硫化水素などの気体を液化し、分子凝集の概念を確立した。理想気体の法則からは、気体は液体とならないが、実際は多くの気体が液化できることが示された。

ファラデーの業績は、基礎科学である物理と化学だけではない。師であるデービーは、鉱山の安全灯「デービー灯」の発明で知られるが、ファラデーも実学の研究に数々の業績を残した。ファラデーは、王立研究所の仕事だけでなく、英国政府や民間企業の依頼にもこたえ、大気汚染の研究、テムズ川の汚染問題、特殊鋼の研究、炭塵爆発の研究、海洋立国イングランドにとって非常に重要な船舶の防食や灯台建設など、様々な実学分野で活躍した。一方では、平和主義者を貫き、政府の化学兵器開発には協力をしなかった。

ファラデーは、科学史上、社会に最も大きな影響を与えた科学者のひとりとして記されることが多く、発電機やモーターの発明、反磁性の発見、電気分解の発見、気体の液化など、もし、ファラデーがいなければ、科学の発展はもっと違ったものになったのかも知れない。

ファラデーは、科学の啓蒙活動に熱心に取り組んだことでも知られる。一般向けの講演「The Chemical History of A Candle」が有名で、この講演でファラデーは、「この宇宙をまんべんなく支配するもろもろの法則のうちで、ロウソクが見せてくれる現象にかかわりをもたないものはひとつもないといってよいくらいです」と説明した。ファラデーが行った講演は、物理・化学の啓蒙書として出版され（1860年）、日本でも、「ロウソクの科学」「ろうそく物語」「蠟燭の科学」などの名前の翻訳本が出版されている。

ファラデーが今も科学者として非常に高い尊敬を集めている理由には、その業績

だけでなく、生い立ちや科学者としての姿勢がよところも大きい。ファラデー家は貧しく、マイケル・ファラデーはほとんど学校教育を受けておらず、20歳になるまで、製本業・書店で丁稚奉公をして働いた。その間に読んだ本から多くの科学の知識を得たが、やがて、ハンフリー・デービーの講演を聴講する機会に恵まれ、デービーとの接点ができた。翌年、デービーが実験で負傷、王立研究所に欠員が出たため、ファラデーはデービーの助手として雇われることになった(1813年、22歳)。

ファラデーはデービーの助手として化学と物理と工学の分野で頭角を表わしていった。デービーらが失敗した電動機を完成させたが、これを許可なく公表したとしてデービーの怒りを買って(1821年)、デービーは、ファラデーが電磁気の研究を行うことをやめさせ、王立協会の会員になることにも反対した。しかし、ファラデーが電磁気学の分野で行った数々の発見や発明は、ジェームズ・クラーク・マクスウェルやアルベルト・アインシュタインに大きな影響を与え、20世紀の電磁気学、電気工学、電子工学の礎となった。ファラデーが先鞭をつけた気体の液化は、その後、空気の液化や産業ガスの技術につながっていった。

ファラデーの周囲からの評価は高く、2度も王立協会の会長に選出されたが、ファラデーは、これを辞退、貴族の称号も辞退し続けた(ボイル、デービー、ニュートンはサーの称号を持つが、フックとファラデーは平民のままである)。オックスフォード大学はファラデーに名誉博士号を授与したが、ファラデーは生涯、世俗の栄達を拒み続けた学者として知られている。

ファラデーは、19世紀最大の科学者と呼ばれ、全時代を通じて最大の実験科学者とも呼ばれる。

2. 1. 2. 2 ジュールとウィリアム・トムソン

(James Prescott Joule, William Thomson/1st Baron Kelvin/Lord Kelvin)

19世紀の中盤、「ジュール=トムソン効果 (Joule-Thomson effect)」が、ジェームズ・プレスコット・ジュールとウィリアム・トムソンによって発見、理論化された (1861年)。

ジュール=トムソン効果は、短く「JT効果」あるいは「JT膨張 (Joule-Thomson expansion)」と呼ばれることも多く、気体を取り扱う技術者ならば、誰もが知っている物理の現象である。JT効果を用いたJT

膨張によって数々の気体の冷却・液化が実現され、アンモニア、硫化水素、二酸化炭素、エチレンなどが液化された。ガス屋としては、JT効果を発見した二人、ジュールとウィリアム・トムソンのことを知っておいた方がよい。

(1) ジェームズ・プレスコット・ジュール

ジェームズ・プレスコット・ジュール (1818~1889年、イングランド) は、SIのエネルギーの単位、Jに名前を残し、二つのジュールの法則で知られる物理学者である。ジュールの第一法則 (Joule's first law) は、電流と発熱量 (ジュール熱) の関係を表わす物理の法則である (1840年)。

$$Q = I^2 R t$$

ここで、 Q は熱量、 I は電流、 R は電気抵抗、 t は時間である。

電流が抵抗線を通るときに発生する「ジュール熱」 (Joule heating) は、発熱量が電流によって容易に制御できるため、現在でもジュール熱を利用する電熱器が広く使用されている。ジュールの第一法則は、ハインリヒ・レンツが独立して発見しているため、ジュール=レンツの法則とも呼ばれる (Joule-Lenz law)。

ジュールの第二法則は、「理想気体の内部エネルギーは温度にのみ依存する」という熱力学の法則である。最初の実験は、ゲイ・リュサック (1809年) によって行われ、より精度をあげた実験がジュールによって行われ (1845年) (「ゲイリュサック・ジュールの実験」)、確立された。

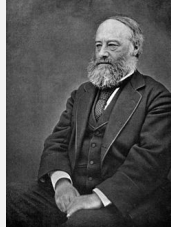


図 2-1-18-ジェームズ・プレスコット・ジュール (1818~1889年) (Wikipedia)

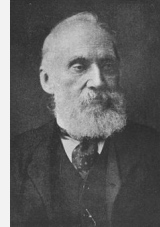


図 2-1-19-ウィリアム・トムソン (ケルビン卿) (1824~1907年) (Wikipedia)

現在の熱力学で用いられる一般的な記号で表すと

$$(\partial U/\partial V)_T = 0 \quad , \quad (\partial U/\partial P)_T = 0$$

となる。

ここで、 U は理想気体の内部エネルギーである。

ふたつの法則は、いずれもジュールの法則と呼ばれるが、第一法則は、電流と熱に関するもの、第二法則は、理想気体のエネルギーと温度に関するものである。

ファラデーは、電気と化学・気体の研究で多くの成果を残したが、ジュールも同じように電気と気体の研究を行っている。電気、気体、化学反応は、いずれも科学の重要なテーマとなっていた。

ジュールは病弱のため正規の学校教育を受けず、家庭教師について学習をした。科学や数学は家庭教師のひとりジョン・ドルトンから学んだ。ジュールは、大学や研究機関の職にはつかず、家業である醸造業を営むかたわら自宅で熱力学の研究を行っていた。ジュールは「アマチュアの科学者」であった。

19世紀初頭、ジュールが生まれる少し前に、トマス・ヤングによって「エネルギー」という新たな概念が提唱された(1807年)。ジュールは、熱の仕事当量の測定に熱心に取り組んだ。他にも多くの学者が熱の仕事当量の研究を行ったが、ジュールは最も大きな成果を挙げ、熱の仕事当量の研究が、ジュールの第二法則や熱力学の第一法則の発見につながった。

物体に与えた熱量を Q 、与えた仕事を W とすると、物体の内部エネルギーの変化量 ΔU は、

$$\Delta U = Q + W$$

となる。これが、熱力学第1法則 (the first law of thermodynamics) であり「エネルギーが保存される」という重要な法則である。エネルギー保存則は、熱力学における3つの重要な法則のひとつであり、発明されて間もないエネルギーには保存されるという性質があることが示された。ただし、エネルギー保存則は、熱力学が取り扱う範囲における経験則であって、物理学全般において成り立つものではない。20世紀の現代物理学によって、エネルギーと質量が統一されるようになってからは、エネルギーが単独では保存されない状況も多くなっている。

17世紀に、ボイル、フック、ニュートンといった科学者によって錬金術は科学に変わっていったが、19世紀に生まれたエネルギーの概念が科学をさらに発展させることになった。ラボアジェが提唱した質量を持たない元素カロリック(熱素)は、ジュールらの研究によって否定されていった。

(2) ウィリアム・トムソン

ジュール＝トムソン効果のもうひとりの発見者、ウィリアム・トムソン（1824～1907年、アイルランド）は、電磁気学、熱力学、地球物理学などにおける数々の業績が知られる物理学者である。晩年になって、ケルビン卿という英国の爵位が与えられたため、科学史には、トムソンとケルビンの両方の名前が残っている。

ジュール＝トムソン効果のトムソンと熱力学温度の単位ケルビンは、同じ人物である。なお、物理学におけるトムソンの名前は、電子や安定同位体の発見者である JJ トムソンが同時代の物理学者として有名なので、ここでは W.トムソンと記すことにする。ジュール＝トムソン効果のトムソンは W.トムソン（ケルビン卿）である。

W.トムソンは、ジュールとは、研究者としての経歴がかなり異なる。わずか 10 歳で大学に入学、22 歳で教授となって英国初の物理学研究室を開いた。ジュール＝トムソン効果を発見した後に、大西洋横断ケーブルの敷設に成功して、その功績によって貴族の称号を得てサー・ウィリアムとなり、その後、男爵となって（68 歳）からは、ケルビン卿を名乗るようになったため、晩年の業績では、ケルビンの名前が残る。W.トムソンも同時代の研究者と同様に電磁気や気体の研究を行っており、デービーやファラデーの影響を強く受け、ファラデーが発見した常磁性、反磁性の研究を行い、透磁率の概念を導入している。

(3) トムソンとジュールの共同研究

W.トムソンは、電磁気などに続いて気体や熱力学の研究を始めた（1845年、21歳）。W.トムソンは、ジュールが行った熱の仕事当量の研究を高く評価して公表した（1848年）。アマチュア科学者ジュールは、科学の天才マイケル・ファラデーと物理学の天才 W.トムソンに見出され、王立協会の会員にもなり一躍注目されるようになった。

気体の研究を始めた W.トムソンは、気体を自由膨張させると温度がわずかに下がるのではないかということに気付き、これをジュールに伝えた。ジュールは、人に会うことや、外に出ることを非常に嫌い、自宅の研究室に引きこもって研究を行うことを好んだが、W.トムソンに誘われ、二人は共同で気体の膨張に関する研究を始めることになった（1852年、ジュール 34 歳、W.トムソン 28 歳）。

引きこもりの科学者ジュールを若き物理学者 W.トムソンが引きずり出し、ジュール＝トムソン効果につながる研究が始まったのである。

しかし、当時の実験技術では、気体の膨張による温度変化を高精度に検出することは容易ではなかった。二人は、長期間、実験を繰り返し、気体の膨張に伴う気

体の温度低下の確認に成功した。この現象は、理想気体の理論からは考えられない新発見であった。

彼らが製作した気体の膨張実験装置は、ジュールの醸造所に設置された。ジュール家が没落した後は、自宅が実験室になった。実験の中止や数々のトラブルに見舞われたが、実験開始から10年後、二人は精密な温度測定に成功し、その成果は、ジュール=トムソン効果として発表された（1861年、ジュール43歳、W.トムソン37歳）。

彼らは、論文発表後も実験を継続、実験場の移転に伴って、行く先々で、大きな騒音や煙を出す熱機関（コンプレッサー）は、近隣からの苦情や紛争を引き起こした。彼らの実験装置は、3馬力程度。現在の内燃機関であれば、排気量20ccほどの小さなガソリンエンジン相当であるが、17世紀の真空ポンプが巨大科学であったように、最初の熱機関の実験装置もやっかいなものであった。

（4）ジュール=トムソン効果の理論

後に、ハイケ・カメルリング・オネス（1853～1926年、オランダ）によって熱力学に「エンタルピー」の概念が導入され、ジュール=トムソン効果は「等エンタルピー過程（変化）」と理解されるようになり、次式のように表わされるようになった。

$$\mu_{J-T} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

ここで、 μ_{J-T} は、JT係数（ジュール=トムソン係数）、単位は、[K/Pa]であり、右辺の下付き添え字 H は、等エンタルピー過程であることを表わしている。

変形するとJT係数は次式で表わされる。

$$\mu_{J-T} = \frac{TV}{c_p} \left(\alpha - \frac{1}{T} \right)$$

ここで α は熱膨張率、 c_p は定圧熱容量である。

この式から、JT係数は、物質によって異なることが分かる。理想気体では、熱膨張率は温度に反比例、 $\alpha T = 1$ であるから、JT係数は常にゼロとなり理想気体にはJT効果がないことも分かる。JT膨張のイメージとしては、急激に分子間の距離が増大する時に、気体分子が分子間力に対して行う仕事の結果として考えることができる。

なお、膨張する気体が外部に対して仕事を行う断熱自由膨張（準静的断熱過程における等エントロピー膨張）も断熱過程であるため、用語が紛らわしく注意が必

要である。等エントロピー過程は、機械の効率があるため、実際には実現できないが、それに近い膨張過程（膨張タービンや膨張機を用いた外部仕事）があるため、深冷空気分離プロセスでは、等エンタルピー膨張は、「JT 膨張」、等エントロピー膨張（断熱自由膨張）に近い膨張は「タービン膨張」と呼んでいる。

JT 係数は、正負いずれの値もとるが、ゼロでない時、JT 膨張によって気体の温度が変化する。JT 係数が正の時、膨張後に温度が低下、JT 係数が負の時、膨張後に温度が上昇するが、多くの条件下で、温度が下がるため、これを利用した気体の液化の研究が進められた。JT 膨張によって温度が上昇する場合については、後述する（→「3.8 ヘリウムの貯蔵・輸送」）。

(5) ジュール=トムソン効果の利用

それまで、気体の温度を下げるには、より温度の低い媒体（冷媒）を用意して冷却しなければならなかったが、JT 膨張によって、気体がそれ自身で温度を下げるができることが分かったので、技術的に到達可能な低温の範囲が広がった。もし、気体がそれ自身で温度が下げることができなければ、どこまでも低い温度を達成するために、いつまでもそれより温度の低い冷媒を用意しなければならず、最終的には、その冷媒を作る方法がなくなるが、JT 膨張のおかげで制約がなくなった。

なお、高圧ガスの容器からガスを取り出す時に容器が冷えることがあり、これが JT 膨張と勘違いされることがある。JT 膨張によって温度が変化するの、放出されて急激に圧力が低下したガスの方であって、容器に残ったガスの膨張を説明するものではない。ガスを使用すると容器内部に残るガスの量がわずかに減り、圧力もわずかに下がり、容器に残るガスのエンタルピーが減少する。これはガスの量が変化する過程であって、JT 膨張による温度変化を意味するものではない。

また、LPG を大量に使用すると容器が低温になり着霜し、流量も低下することがあるが、これは、LPG の気化熱の供給が、外気だけでは間に合わない時に見られる現象であって、これも、JT 膨張による温度低下ではない。JT 膨張は、気体の等エンタルピー変化であり、外部との熱の授受や潜熱によって起こる現象を説明するものではない。

なお、ジュール=トムソン効果は、気体の等エンタルピー膨張における温度に関する現象を表わすが、ジュール効果は、導体を流れる電流と発生する熱の関係、すなわちジュールの第一法則（ジュール熱）のことであり、トムソン効果は、温度差がある金属上の 2 点間に電流を流すと、熱を吸収・発生する現象のことを表わしている。ジュール効果、トムソン効果とジュール=トムソン効果を混同しな

いようにしたい。

ファラデーによって気体と液体は、同じ分子の異なる状態であると理解されるようになり、実在気体の多くが液化されるようになり、ジュールと W.トムソンによる JT 効果の発見によってさらに多くの気体が液化できるようになった。しかし、19 世紀後半になっても、いくつかの気体は技術的困難さから液化することができなかつたため、一時期、これらの物質は、永久ガス (permanent gases) と呼ばれた。

1877 年の時点では、窒素、酸素、水素、メタンが「永久ガス (永久気体)」であった。当時、周期表でその存在が予言されていたアルゴンやヘリウムなどの希ガスはまだ何も発見されていなかったため、永久ガスの中には含まれていなかった。その後、発見された新元素の中では、ヘリウムが最も液化が困難な永久ガスとなった。

現在では、よく知られているように酸素や窒素は液化され、最も液化温度が低いヘリウムまで、全ての気体が液化されている。冷媒による冷却だけでは、最も液化しにくいヘリウムを液化温度まで下げることができない (そのような温度の冷媒が用意できない) が、オネスは、リンデが製作した冷凍機でヘリウムを段階的に冷却し、最終段階に JT 効果を利用してヘリウムの温度を低下させ、世界で初めてヘリウムの液化に成功した (1908 年)。

この時、永久ガスが消滅した。理想気体は概念上の気体であって実在しないが、特定の条件下では実在気体を理想気体として取り扱うことができない訳ではない。理想気体は実在気体を記述するための基本モデルでもある。これに対して永久ガスというものは、物理モデルではなく、概念そのものが誤っており、用語自体が事典に掲載されていない。19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて行われた気体の液化の研究の中で、技術的に液化が困難な物質がいくつかあり、研究者を悩ませたため、一時期 (約 30 年間)、液化できない「永久ガス」が存在するのではないかと思われた時に作られた歴史上の言葉である。永久ガスにリストアップされたガスの液化が実現されたのは、酸素 1877 年、窒素 1883 年、水素 1898 年、ヘリウム 1906 年である。

工学的には「非凝縮性ガス」という言葉はあるが、ガス屋には、液化しないガスはない。