

2.2 階層（物質の階層構造）

自然界を観察し、それを理解しようとする時、「階層」の概念が非常に重要である。階層を理解することによって、自然界の構造が整理され、理解しやすくなる。階層から俯瞰することによって様々な技術分野やビジネスの位置付けが、はっきりしてくる。

ガスは見えない、ガスの分子は、あまりにも小さく、肉眼でも顕微鏡でも見ることができない。階層が異なるということは、容易には観測ができず、理解が難しいということである。しかし、われわれは、ガスの分子を取り扱い、利用している。自分の目で見て、手で触れられるものしか信じないという人にとって、ガスを理解し取り扱うということは非常に難しい。先人の成果に学び、異なる階層を理解するようにしなければ、ガス屋の商売は成り立たない。見えないものを想像する力が必要である。ここでは、物理学における階層（物質の階層構造）を意識して、ガスの物理を整理していきたいと思う。

産業ガスのビジネスや技術は、一般の工業に比べて非常にニッチだと思われる。しかし、物質の階層からみると産業ガスのビジネス領域は、他のどの産業よりも広いかも知れない。化学、食品、鉄鋼、電子工業、など様々な産業は、得意な領域・分野を持ち、学問分野においても、それぞれの学問が得意とする階層を持っているが、ガス屋の得意分野は何となくぼんやりとしている。ガス屋のビジネスの基本は、ガス分子を売る商売なので、売り物は 10^{-10}m の階層周辺と言えるが、ガスを利用する技術や顧客、すなわちガス・アプリケーション（ガス利用技術）の分野は、非常に広範である。ガス屋のビジネスソリューション（顧客に提供する問題解決の手段）は、広い階層に広がってきている。他の産業が専門的でピンポイントな技術を得意としているのに対して、むしろニッチだと思われる産業ガスの方が、はっきりとした得意分野を持たず、より一般的な科学の領域で商売をしている。

現在の産業ガスビジネスは、電子材料を扱うが、量子や電子の階層は、分子の階層よりも小さい。窒素やアルゴン、ヘリウムなどの液化には量子効果が大きく関わっている。超低温や超電導も、量子の階層の議論であり、分子の話ではない。

ガス屋のビジネスである安定同位体の製造や同位体化合物の合成は、化学合成や化学工学分野の技術が用いられるが、同位体そのものは、原子核の階層の話であるから分子の階層の常識が通じない。安定同位体ビジネスにおける PET 診断は、粒子-反粒子の対消滅、素粒子の階層の現象を利用している。分子の階層の理解だ

けでは、ガス・アプリケーションの中身が理解できない時代になっている。

ガスビジネスには、分子よりも大きな階層も現れる。材料ビジネスでは、ガス分子よりも一桁階層が大きい 10^9m （ナノテクノロジー）があり、さらに3桁大きい階層の 10^6m のマイクロメートル（ミクロンレベル）にもガス・アプリケーションがある。空気や大気の構造、エネルギー資源など、地球規模の資源や環境の話になると、今度は、非常に大きな階層の議論となる。エネルギー、資源、宇宙開発の分野は、産業ガスにとって重要なビジネス領域である。最先端の研究開発の領域では、さらに桁外れに大きな階層も現われる。産業ガスの基盤は、空気分離という非常にニッチな技術であるが、そこから供給されるガスが利用される領域は極めて広い階層の中にある。ガス屋の仕事はあまり広く知られていないため、われわれは、主要産業から見てどこか片隅にいるような気になることもあるが、実際のビジネスは非常に広い領域を相手にしている。

20世紀以降の科学は、物質だけでなく、エネルギー、空間、時間などの自然を科学の対象とした。その結果、時間も空間も絶対的なものではなく、現実の世界には、無限も永遠も存在しないことが分かった。それまで、自然を表わす時、非常に大きな空間には「無限」、非常に長い時間には「永遠」という言葉が使われてきたが、これらは自然界を正しく表わしていないことが明らかとなった。無限や永遠は、数学の概念や文学の表現であり、科学の概念ではなくなった。

20世紀後半から、自然界を記述する物理の計量は、時空もエネルギーも全て有限の値を持つため、階層も有限の値で表現される。天文学的数字はけっして無限大ではなく、非常に小さな時空もけっしてゼロではない。何もない空間から物質が生まれ、無から有は生まれぬという古い常識も消えた。時間も未来永劫続くのではなく、その始まりと終わりが研究されている。自然を正しく理解するためには、まず時空が有限であることから理解する必要があり、その大きさを考える必要がある。

階層の尺度は大きさであり、通常理解の範囲を超えることが多いが、これをただ単に「非常に大きい」とか「非常に小さい」とひとくくりにするのではなく、どのくらい大きいのか、どのくらい小さいのかというその値を理解していくことが、非常に重要である。本節では、具体的な階層の例を示し、産業ガスビジネス・技術との関わりを学ぶ。

2. 2. 1 階層と尺度

2. 2. 1. 1 長さで表わされる階層

階層は、物質世界の構造であり、自然科学の階層は、「大きさ」である。現在の自然界は、主に4つの次元を持つ時空間（空間の3次元と時間の1次元）だけが観測可能であり、階層を表す尺度として、空間の1次元「長さ」が用いられる。

図2-2-1は、シェルドン・グラショー（1932年～、米国）が描いた「ウロボロスの蛇」の図である。最も大きい階層「宇宙」と最も小さい階層が深く関わっているということを「自の尻尾を飲み込む蛇」の絵にたとえて描いた有名な絵である。出典は、KEKのHPに日本語訳で示されたもので、原本の単位はcm、真ん中には $10^{\pm 30}$ cmが書かれている。ここでは、それ以外の数値の単位をmに変えてある。また原文は、原子が 10^6 cm近くに書かれているが、実際は 10^8 cm（ 10^{-10} m、 1\AA ）であるから、 10^{-10} mを追加した。グラショーの原典では3桁刻みに描かれ、数値とレイアウトは全体的に大雑把に表現されているため、原子がナノメートルよりも一桁小さいことを強調した。

この図の本来の目的は、非常に小さな階層である素粒子を研究することが、最も大きな階層である宇宙の研究につながるという様子を示すことであり、宇宙の階層構造が、10進法の60桁の中（ $10^{\pm 30}$ cm）に表現されている。

グラショーは、素粒子研究の権威であり、電弱相互作用（電磁気力と弱い相互作用を統一する相互作用）を説明する理論を提唱し、これをアブドゥッス・サラームとステューヴン・ワインバーグがこれを発展させて電弱統一理論を完成させたことで知られる（1979年、3人にノーベル物理学賞）。

無限、永遠、ゼロなどの概念は、数学や工学的取り扱い、あるいは文学には存在するが、現実の世界には存在しない。物理学は、物質と時空を取り扱う科学であるため、階層は有限である。階層構造の重要な性質は、小さな階層の性質は大き

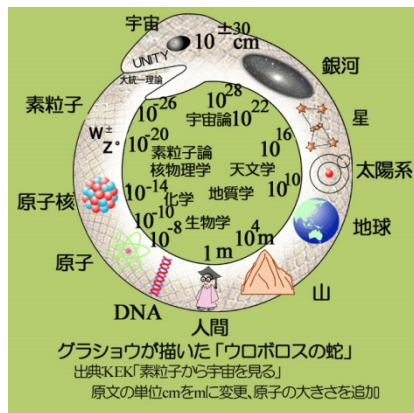


図2-2-1-グラシューが描いた宇宙の階層構造「ウロボロスの蛇」

な階層に受け継がれ、上位の階層は下位の階層の性質を合わせた性質を持つということである。すなわち上位の階層は、下位の階層の法則に支配される、ということであり、科学の「何故」を探求する時、人々は、次々と小さな階層を調べようとする。

たとえば、人間が、分子の階層で何かの操作しようと思えば、人間の大きさでは小さな階層に直接影響を与えることはできないので、分子の階層あるいはもっと小さな階層の現象、性質を知り、これに使える道具を編み出して利用する。

分子ほど階層が離れていない場合でも、たとえば微生物や病原体の階層であっても、直接ヒトの階層からは操作ができない。ウィルスはヒトより8桁も小さいので、これを踏み潰したりつまみ出したりすることはできない。対抗手段としては、同じ階層以下で機能するもの、ワクチンや免疫などが必要となる。

時空の階層を表現する尺度には、時空そのもの、あるいは時間や体積または面積などでは表現しにくいので、図2-2-1のように、一次元の「長さ」が用いられる。

階層を表す長さの単位は、メートル(m)を、10の冪乗、オーダーで示しており、階層は、文字通り「桁違い」の長さ、大きさによって表現されている。

図2-2-1には、無限大とゼロがない。数学の世界には、二倍や半分の概念があり、最大と思われる数値の二倍はさらに大きく、最小と思われる数値の半分はさらに小さい。したがって、正の実数の範囲であれば、最大は「無限大」、最小は「ゼロ」と表現される。しかし、これは数学の世界の話であって、現実の世界には、宇宙の大きさの二倍の長さや、プランク長さの半分の長さがない。光速度は有限で、この速度を越えて情報を伝えることができないため、事象の伝達には「瞬時」ということもない。たとえ目の前の事象であっても、同時は一致しない。

工学的には、「無限遠」「無限な広がり」「瞬間」「同時」などの言葉がしばしば用いられ、特に不都合は生じない。しかし、科学的にみれば、これらは近似的表現であり、便宜的な概念である。現実の世界には、無限大の長さ、ゼロの長さ、無限の時間、ゼロの時間などは存在しない。20世紀以降の科学は、自然界が数学が示すようなゼロや無限のような極限值を持っていないことを明らかにした。

表2-2-1に階層の具体例を示す。

物理の解説書では、階層を示す単位に、センチメートル(cm)が使用されることも多い。これは、19世紀の伝統的な物理学がCGS単位系で記述されることが多かったためではないかと思うが、詳しい理由は分からない。

表 2-2-1 階層（長さ）の例

階層	対象の例	研究領域・理論・(力の到達距離)	
∞	なし（科学の世界にはない）	数学のみ	
10^{36} m	現在の宇宙の大きさ	インフレーション 宇宙論	量子重力理論
10^{27} m 27	観測可能な宇宙 （半径 465 億光年の球体）	ビッグバン宇宙論	科学が取り扱う 最大の階層
10^{22} m 22	分子雲、アンドロメダ銀河までの距離、銀河団	天文学	
10^{21} m 21	銀河、10 万光年	天文学	
10^{16} m 16	1 光年 9.49×10^{15} m		
10^{13} m 13	1 光日 2.6×10^{13} m	惑星科学	↑重力が支配的
10^{12} m 12	太陽系の大きさ、50au		
10^{11} m 11	太陽までの距離、8 光分 地球の公転軌道、1au ※	惑星科学	月まで 38 万 km
10^9 m 9	太陽の直径		
10^8 m 8	月までの距離、木星の直径、 1 光秒、29 万 9979km		
10^7 m 7	宇宙↑地球の外	大気圏	
	地球の直径、大気圏の高度	地球物理学	
10^6 m 6	ナイル川の長さ、月の直径	地球化学	
10^5 m 5	カーマンライン	便宜的に宇宙とされる高度	宇宙ステーションの高度
10^4 m 4	成層圏の高度 対流圏の高度	気象学 航空工学 空気	望遠鏡
10^3 m 3	高山病（2200m〜）	↓ヒトの居住域	
10^2 m 2	建築物、野球場、船、大型植物	人工物、 工学の領域	
10^1 m 1	列車、大型動物		
10^0 m 0	人間、自動車	工学の領域	4 つの力のうち 電磁力が支配的
10^{-1} m -1	雀、ボール	生物の領域	
10^{-2} m -2	蚊、昆虫		
10^{-3} m -3	蟻、昆虫		
10^{-4} m -4	髪の毛、ヒトの目の分解能	↑肉眼の世界	虫眼鏡
10^{-5} m -5	ラップの厚さ、微生物		顕微鏡
10^{-6} m -6	細胞、ミクロン、微生物、細菌	MEMS	
10^{-8} m -8	ウィルス		電子顕微鏡

↑ マクロスコピック (巨視的) ↑			
10^9 m -9	← メソスコピック →	ナノテクの領域、 NEMS、CNT など	
↓ ミクロスコピック (微視的) ↓			
10^{-10} m -10	分子・原子、 1Å (1au) ※	化学の領域 分子生物学 ガスの化学	量子力学 量子化学
10^{-14} m -14	原子核	核物理、同位体 複合粒子、ハドロン (バリオン、メソ ン)	弱い相互作用
10^{-15} m -15	古典的電子径、1fm	素粒子、 レプトン(電子、ニ ュートリノ)	量子電磁気学
10^{-18} m -18	電磁的電子径		
$<10^{-29}$ m	クォーク		量子色力学 強い相互作用
1.616×10^{-35} m	プランク長さ (基準質量のシュ ヴァルツシルト半径)	物理学が扱う最小 値	量子重力理論
	誕生時の宇宙の大きさ	インフレーション 宇宙論	
1.35×10^{-57} m	電子のシュヴァルツシルト半径	計算上の最小長さ	
0	なし	数学にはゼロがあ る	

注意：理論上与えられる長さも含まれており、全ての長さが計測可能という訳ではない。

※au：天文単位は、例外的にSIとの併用が可能とされている。

※au：オングストローム単位の $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$ は、SIでは認められないが、日本の計量法では使用が可能

しかし階層を表す数値は、非日常的な桁ばかりである。メートルでもセンチメートルでも、分かりにくさは同じようなものである。はやりのナノやマイクロといった接頭語もナノメートルやマイクロメートルで初めて意味が分かるので、センチメートル基準では分かりにくい。ここでは SI の基準長さであるメートル (m) で統一することにした。

また、原子や分子の大きさなどにしばしば用いられていた、オングストロームという長さは、 10^{-8}cm と書かれることも多かったが、これもセンチメートルを使うと、ナノメートル 10^{-9}m との大小関係がわかりにくくなる。cm を使用せずに、 10^{-10}m と統一する方が勘違いを防ぎやすい。

メートルで統一して表わす物理学の階層は、表のように 10 の 27 乗メートルから 10 のマイナス 35 乗メートルの範囲にある。

メートル (m) という単位は、国際標準の SI (国際単位系) における「長さ」であるが、これはよく知られるように地球に依存した単位である。メートルの定義は、いくつかの候補から、地球の子午線全周長の 4 千万分の 1 の長さが選ばれた (1790 年)。その後、白金メートル原器 (1869 年)、白金-イリジウム原器 (1889 年)、クリプトン原子 (^{86}Kr) の遷移波長 (1960 年)、真空中の光速 (1983 年) と定義するものは変わっていったが、基本的には地球に依存したメートルという長さが先にあって、他のものがそれを元に測られた。また、メートルだけでなく他の多くの単位が、地球や地球上によくある物質の物性に依存している。

このような考えは、地球が自然の全てであった時は、理にかなっていたのかも知れないが、自然の概念がもっと広がり、地球が宇宙の一部であることが分かっているからは、このような普遍的でない偏った単位は、自然を表わす尺度としては合理的ではないという考えが生まれた。

理論物理学には、「自然単位系」という地球に依存しない単位があり、自然単位系のひとつに量子の生みの親であるマックス・プランクが 20 世紀初頭に提唱した「プランク単位」がある。プランクが活躍した時代には、「宇宙には特別な場所はない」という「原理」は、まだ確立されていなかったが、プランクは、「自然界を記述する尺度は、メートルのように地球に限定された特殊なものではなく、より普遍的であるべきだ」と考えて、プランク単位を考案した。マックス・プランクの時代、宇宙は今よりもはるかに小さく、太陽の他に恒星があったとしてもそれは銀河の範囲に限られていたが、プランクは地球に偏らない単位が必要だと考えた。

プランク単位では、5 つの基本単位、時間・長さ・質量・電荷・温度が定義され、長さは「プランク長」と呼ばれる最も小さな階層である。プランク長よりも小さな長さが存在しないため、これを基準にすると、物理学で取り扱う全ての階層が、

これよりも大きくなり、表2-2-1の階層はプランク単位の倍数で表わすことができ、冪乗がプラスだけとなる。メートルには0.1mや 10^{-6} mがあるが、プランク長(l_p)には0.1倍や0.5倍などといった値がない。

プランク長は、その定義が、人間や地球に依存しない宇宙普遍のものであり、自然界の階層を表現するのに最もふさわしい長さの単位となり、表2-2-1に示される階層(物質の階層構造)は、1プランク長から最も大きな階層「観測可能な宇宙」 5.444×10^{61} プランク長までの61桁(10進数)の間に記述される。

本当ならば、これは非常に分かりやすい長さの単位であるはずであるが、1プランク長さ(l_p)を、SIに換算すると、表に示すように 1.616×10^{-35} mである。半端で、非常に小さな値であるが、その原因は、プランク長の決め方にあるのではなく、メートルの決め方にも理由がある。自然を表現する長さの単位1プランク長さに対して、人間にとって身近な長さ、1メートルは、あまりも大きい。

1メートルと1プランク長は35桁も異なるため、自然界の階層を数字で表現してイメージしようとするれば、どの尺度を使っても、必ずどこかが分かりにくくなる。

自然を測る尺度をどのように決めても、桁違いなものが現れる。たとえば、1モルの物質量を表すアヴォガドロ定数($6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$)や、エントロピーと物理量を表すボルツマン定数($1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)もSIにおける数値は、桁外れである。最も基本的な物理定数であるプランク定数は34桁、万有引力定数は11桁、真空の誘電率は11桁と、物理の定数には、非常に大きな冪乗がつきものである。われわれの周りの物質の量を数えるとその数は非常に大きく、桁外れの計算例は、日常的にいくらでもある。長さの場合は、最大で61桁までであるが、これは、アヴォガドロ定数よりは範囲が広いが、普通の電卓で計算できる。それならば、長さもいっそのこと、プランク長にしても取り扱い可能であり、理論物理学では、プランク単位が用いられている。

しかし、一般的な感覚として、実学の分野では、プランク単位の使用は、相当に厳しい。たとえば、ヒトの身長は 1.05×10^{35} プランク長(1.7m)、東京スカイツリーの高さは 3.92×10^{37} プランク長(634m)である。この数字がヒトの大きさと構造物の大きさを正しく表現しており、プランク長の10の35乗倍の人間とプランク長の10の37乗倍の4倍のスカイツリーの違いは非常に大きいはずである。しかし、慣れない数字は、非常に実感しにくい。

われわれは、既にメートルという長さの尺度に長い時間、慣れており、日本では、100年くらいの歴史がある。地球の直径程度であればキロメートルの方が理解しやすい。それより大きくなるとメートルではよく分からないが、プランク長ではもっと分かりにくいので、光速度を利用する距離(光年)や年周視差、天文単位などが用いられる。大きい方は、 10^7 m(1万km)までであれば、メートルが分かりやす

い。1メートルや100メートルであれば、メートルは、日常生活で十分にその大きさを理解できる尺度である。

小さい階層では、マイクロメートル 10^6m やナノメートル 10^9m といった単位がよく使われるようになってきている。ナノテクという言葉は、まさしくメートル法限定の「 10^{-9} 」を意味する表現であり、本来の概念である「メソスコピック領域」という言葉よりも、「ナノ領域」の方が知られるようになってきている。実際にナノメートルを測ったり、見たりする機会はほとんどなく、この大きさを実感することはできないが、ナノ（10のマイナス9乗）や原子レベル（10のマイナス10乗）までは、メートルという単位を使っても、イメージが沸きそうである。

メートルは特別な単位であるが、35桁も異なるプランク長で階層を数え、表わすのは難しい。メートルはそのままにしておいた方がよさそうである。

補足2-11：プランク単位と最も小さな階層・プランク長
(関連「2.3節 量子力学」)

(1) 地球が中心ではないということ、cosmological principle

メートルは、地球の大きさや水の物性など特別な条件から決められたものであり、人間の都合で決められたものであるから、自然界を表わす尺度としてふさわしくないという考え方がある。

現在、1mは、光が1秒間に進む距離1光秒の299 792 458分の1と定義されているが、そもそもは、地球の子午線を意図して決められているので、地球特有の尺度である。時間の1秒も同様で、より普遍的であるはずの光速の方が地球単位によって約30万km/秒という半端な数字にされている。

地球は、自然界（宇宙）の平均から外れた不自然な存在である。星が存在すること自体、自然の平均から外れているが、地球の大きさや自転速度、公転の速度など全ての値が、地球特有のものであって、普遍的なものではない。

かつて地球のまわりを太陽がまわっているという天動説が長く信じられていたが、太陽のまわりを地球が回っていると考えた方が合理的であるということから、地動説が主流となった。地動説は太陽中心説であり、動かない太陽の周りを地球などの惑星が回っていると考えると、様々な現象や観測がうまく説明できるようになった。しかし、その後、太陽も運動しており、10万光年ほどの大きさの銀河系の中で約2億年の周期で公転していることが分かった。その銀河系も宇宙に数多く存在する銀河のひとつにしか過ぎず、銀河系は、さらに大きな銀河群の中で運動し、全てのものが、宇宙の大規模構造の中に存在し、運動していることが明らかとなった。天動説が不自然であったように、地動説＝太陽中心説もやはり不自然である。

歴史的には、どこかを中心にするという考え方そのものが合理的ではなく、何かを中心に固定するという説は、ことごとく失敗しているようである。

現代の科学は、「宇宙原理」に基づき①宇宙のどこでも同じ法則が成り立つ②宇宙には中心も端もない、と考えるようになった。

全てが、人間や地球を中心に動いているという古い哲学思想から、どこにも中心がない（「宇宙には特別な場所は存在しない」という科学的な立場にたどり着くまでには、長い時間がかかったが、現在は、この原理が広く認められるようになってきている。どこにも中心はなく、全てが対等であるとする、それを記述する尺度も普遍的でなければならないということになる。

(2) プランク単位系 (Planck units)

プランク単位系は、地球以外の宇宙でも通用する地球に偏らない「自然単位 (natural units)」のひとつである。科学に神を持ち出すのもおかしいが「神の単位」とも呼ばれる。

プランクが量子力学の世界で活躍したのは20世紀最初の四半世紀頃である。一方、それまでのメートル法 (MKS 単位系) を整理して、SI (国際単位系) が国際的に取り決められ、制定されたのは、1954年の国際度量衡総会である。歴史的にはプランク単位の方がSIよりも古い。

プランクは、人々が使っている単位は、時空間も質量も地球や水や太陽など人間中心に決められたものであって、局所的にしか通用しない単位であるから自然界を記述するにはふさわしくないと考えた。長さは地球の子午線の長さが元になっており、質量はその長さから求める体積と水の重さがもとになっており、地球という惑星とそこにあった物質を基準に決められ、時間も地球の運動から決められている。それまで物理学で用いられていた単位は、極めて人間本位の単位であって、宇宙や物質を表す共通の言語ではないと考えた。

プランクは5つの定数を消して単位系を再構築した。

光の速度、万有引力定数、換算プランク定数 (ディラック定数、 $h/2\pi$)、クーロン力定数 ($1/4\pi\epsilon_0$)、ボルツマン定数の5つの物理定数は正規化され、全て「1」とされる。これらの定数は、数値が1になるだけでなく物理学的な次元も消されてしまい、記号そのものが消えてしまう。そのため、単位系は再定義され、法則や定理は、地球に限定されない書式で記述される。

たとえば、地球の単位系であれば、エネルギーは $E = \hbar\omega$ あるいは $E = mc^2$ 、 $E = kT/2$ と示されるが、プランク単位では、 $E = \omega = m = T/2$ となる。

エネルギーは、波動であり、エネルギーは質量であるという式が、定数や係数なしで示される。 $E = mc^2$ ではなく、 $E = m$ であるから、単位系自体が質量とエネ

ルギーを等価としており、エネルギー保存則や質量保存則といった個別の法則もなくなる。

プランク単位系では、質量＝波＝温度＝エネルギーである。

地球上に依存しない自然単位から得られる式は、極めて明解である。光速度もアインシュタインの特殊相対性理論も式としては現われず、単位系そのものが、光速度一定の原理、質量とエネルギーの等価、量子の粒子性と波動性、ボルツマンの定理を含んでいる。定数、係数、法則が式に表れず、質量、温度、量子の性質などが非常に簡単に定式化される。

かつて、熱と仕事の変換可能で、熱量に相当する仕事は「熱の仕事当量」という概念で結びつけられ、詳細な研究が行われたが、現在は、熱と仕事は同じエネルギーであり、カロリー (cal) とジュール (J) は、単に係数で換算される関係になっている。熱はエネルギーの単位が統合されることによって、熱の仕事当量を特に意識することなく取り扱うことができるようになったが、自然単位系によって様々な物理の法則が、その存在を意識することなく用いらることができる。

ただし、その他の単位系では5つの物理定数は有次元であるため、従来の数式に換算する時には、少々複雑な手順が必要となる。

(3) プランク長

天文学や一般相対性理論では、シュヴァルツシルト半径 (重力半径) という長さがよく知られている。非常に大きな重力によって空間が閉じてしまい、光さえ脱出できないという「ブラックホール」の大きさがシュヴァルツシルト半径であり、その大きさは、天体の質量に依存している。(ただし、「ブラックホール」という言葉は1967年に「完全に崩壊した重力物体」という長い名前に代わって考え出されたものである)

カール・シュヴァルツシルト (1873～1916年、ドイツ) は、アインシュタインの一般相対性理論の重力方程式 (1915年) の解を求めた時に、シュヴァルツシルト半径を発見した (1916年)。シュヴァルツシルト半径よりも小さく収縮した天体はブラックホールになり、その大きさは、次式で求められる。

$$r_g = 2GM/c^2$$

ここで、 G は万有引力定数、 c は真空中の光の速度、 M は天体の質量である。

たとえば、太陽のシュヴァルツシルト半径は、約 $3 \times 10^3 \text{ m}$ (3km) である。太陽の直径は約 139 万 km であるから、太陽が作る直径 6km のブラックホールは、太陽よりもはるかに小さく、太陽内部の核融合反応によって発せられる光の大半は、太陽の外に放射され太陽系を照らしている。太陽は、自分自身をブラックホール

に閉じ込めることができるほど大きな質量を持っていないということである。恒星の進化の理論からは、太陽の10倍ほどの星は重力崩壊によって中性子星になり、30倍ほどの質量であれば、重力崩壊がさらに進行してブラックホールが残る。太陽の寿命は残り50億年ほどとされているが、太陽の質量では進化しても重力崩壊することはできない。

式から分かるように、質量が大きいほどシュヴァルツシルト半径は大きく、ブラックホールは大きい。この式は、非常に大きな質量を持つ天体だけでなく、全ての質量に対してシュヴァルツシルト半径を求めることができる。

そこで、プランク単位系の「基本質量」に対応するシュヴァルツシルト半径を、「基本長さ」として定義したのが「プランク長」である。

ここで、プランク単位系における単位質量は、次式でSIに換算される。

$$m_p = \sqrt{c\hbar/G} = 2.176\cdots \times 10^{-8} \text{kg}$$

\hbar はディラック定数（換算プランク定数）。 $\hbar = h/2\pi = 1.054571800 \times 10^{-34} \text{Js}$ 。
添え字のPはプランク単位系を表わしている。

基本質量は、物理的には、コンプトン波長 $\lambda = h/m_p c$ （コンプトン波長は、量子論的に質量を長さに変換する）を π で割ったものと、これに対応するシュヴァルツシルト半径が等しくなる質量、と少々ややこしい定義がされているが、基本質量 m_p に対応するシュヴァルツシルト半径は、次式でSI単位に換算される。

$$l_p = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1.616229\cdots \times 10^{-35} \text{m}$$

l_p は、「プランク長」と呼ばれ、通常の物理学では、これよりも短い長さは現れないとされる長さの基本単位である。ただし、プランク長は、非常に小さな長さではあるが、「量子化」された長さという意味ではなく、あくまでも基本質量に対するシュヴァルツシルト半径として定義されている。単位質量（SIでは約 $20 \mu\text{g}$ ほど）に対応するシュヴァルツシルト半径が極めて小さい。

プランク長さの距離を光が進むのに要する時間を「プランク時間」と呼び、次式でSIに換算される。

$$t_p = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5.39116\cdots \times 10^{-44} \text{sec}$$

プランク時間は、非常に小さな値を持つ時間であり、SIの1秒はプランク時間 1.855×10^{43} という非常に大きな値になる。

20世紀の科学では、宇宙の起源が詳細に研究されるようになったが、最新の研究では、時空は、プランク時間、プランク長さから始まったと考えられるように

なっている。プランク時間より短い時間は存在せず、実時間のゼロも存在しないので、宇宙の時間は、いきなりプランク時間から始まり、その空間の大きさは、プランク長さである。

プランク長さは、プランク時間に光が進む距離とも言い換えることができ、科学はこの距離に起こることを予測することができないという意味で基本の長さと考えられている。現在は、この宇宙の始まりを「プランク時代」(0.5×10^{-43} 秒)と呼び、理論的な研究が行われている。今の科学では、プランク時代の詳細な説明は難しいが、 10^{-12} 秒ほどの時間については、それを記述する仮説が実験(高エネルギーの加速器実験)によって確かめられつつある。

自然単位系は、一般の工学ではあまりみかけないが、量子力学や物性物理で比較的良好よくみかける。たとえば、電子の自由度のひとつ角運動量(スピン)は、 $\pm 1/2$ と示されることがあるが、これはプランク単位による表記である。SIでは、スピンは無次元ではなく、ディラック定数が掛かるため35桁も異なる数値となるが、スピンの値を有次元の値で表すことの方が珍しく、通常のスピンの値は、量子数でありプランク単位で示される。

スピンはプランク単位の方が分かりやすく、SIの方が分かりにくいから、その他のほとんどの物理量は、プランク単位からSIに換算する時に、慣れ親しんだ値からはとてつもなく外れた数値を導き出す。

たとえば圧力は、プランク単位の力とプランク長から得られる面積から再定義され、SIに換算すると、

$$P_p = c^7 / \hbar G^2 = 4.6399 \times 10^{113} \text{ Pa}$$

とても理解できない値になる。

時間の1単位は、 $1t_p = 5.391 \times 10^{-44}$ s、長さは、 $1l_p = 1.616 \times 10^{-35}$ m、質量は、 $1m_p = 2.176 \times 10^{-8}$ kg、素電荷は、 $q_p = 1.876 \times 10^{-18}$ C、温度は、 $T_p = 1.417 \times 10^{32}$ K、力は、 $F_p = 1.21 \times 10^{44}$ N、エネルギーは、 $E_p = 1.956 \times 10^9$ J、…。

基準質量は、1単位が約22マイクログラム(21.76×10^{-6} g)と想像可能な範囲にあるが、他の物理量の単位は、おそろしく桁が異っており、想像が難しい。地球の文明の尺度としては、自然単位(宇宙の標準語)よりも地球中心単位、地球の方言の方がはるかに実用的である。

なお、仏教には、時空を表わす概念が知られており、時間を表わす尺度に、刹那、念(時間の最小値、 10^{-18})、瞬息(10^{-16})などがあり、空間を表わす尺度には、虚空(10^{-20})、虚(10^{-20})、空(10^{-21})などがある。ただし、これらは、具体的な次元

を持たず、漢字文化圏における命数（万や億と同じ数の単位であり、SI における数の接頭語と同じ）として用いられているため、SI における時間「秒」や長さ「メートル」との間の換算や比較を行うことはできない。

したがって、刹那 (10^{-18}) とプランク時間 (5.39×10^{-44} 秒) の大きさを直接比べることはできないが、概念としては、いずれもゼロではない非常に小さな時間の単位である。

補足 2-12：国際単位系 SI

国際単位系の略称は、英語 (International System of Units) ではなくフランス語 (Système international d'unités) の語順から「SI」である。

SI は、メートル法に続く国際的に定められた単位系であり、メートル法がフランスの発案であるため、このように呼ばれる。SI の略語の中に「単位系」という言葉が入っているため、日本語では、SI 単位系とは言わない。ただし、単に SI と書く前後の文脈から判断しなければならないので SI 単位 (SI 単位系に基づく単位) という言葉は使われる。

SI は、1954 年の第 10 回国際度量衡総会 (CGPM) で採択された。世界のほとんどの国で使用ができ、多くの国で使用が義務づけられている。(米国など一部の国では他の単位系も併用)。日本では計量法 (1951 年施行) で一部の例外を除きメートル法の使用が義務付けられ、日本工業規格 JIS が完全に国際単位系準拠となった (1991 年)。

SI の基本単位は次の 7 つ。①時間 (秒 s) ②長さ (メートル m) ③質量 (キログラム kg) ④電流 (アンペア A) ⑤熱力学温度 (ケルビン K) ⑥物質質量 (モル mol) ⑦光度 (カンデラ cd)、モルは「分子」に由来しているが、物質の量として原子、分子、イオン、電子、その他の粒子などにも使用できる。

全ての物理量は定義されたこれらの基本単位を用いて表わすことができるが、基本単位から作られる SI 組立単位がある。組立量の例としては、面積 (平方メートル m^2)、体積 (立方メートル m^3)、速さ (メートル毎秒 m/s) などがあり、数限りなく作られる。

組み立て単位の中には、SI 基本単位によって表わすことができるが、固有の名称を持つものがある。平面角ラジアン、立体角ステラジアン、周波数ヘルツ Hz、力 (ニュートン N)、圧力・応力 (パスカル Pa)、エネルギー (ジュール J)、仕事率 (ワット、W)、電荷 (クーロン C)、電位差 (ボルト V)、電気容量 (ファラド F) 磁束 (ウェーバ Wb)、磁束密度 (テスラ T) などがあり、多くの名称が人名に基づいている。

SI では人名は大文字で書くという決まりがあり、基本単位は、ケルビン K とアンペア A の二つだけである。しかし、組み立て単位には人名に由来するものが多いため、ジュール J やワット W など多くの大文字表記がある。一文字だと紛らわしいものは、二文字で表記されている。Pa、Gy、Bq、Hz など。

2. 2. 1. 2 温度の尺度と温度の単位ケルビン

(1) 温度の概念

ガスを取り扱う時に最も重要な物理量は、温度、圧力、容積である。圧力と容積は、長さとかから定義されるため、感覚的に分かりやすい。しかし、温度は、温度計で測る物理量であって、その実体は非常に分かりにくい。日本には、古くから「寒暑」あるいは「寒暖」という概念はあったものの、西洋から温度という概念が伝わったのは、ごく近年、江戸時代末期のことである。

温度計という日本語が広まったのは、昭和の時代になってから、第二次世界大戦中のことであり、まだ70年ほどの歴史しかない。日本では、空気分離という言葉よりも温度計という言葉の方が新しいのである。温度は、寒暖のようなものではあるが、寒暖そのものではない。寒暖はヒトの感覚であり、温度は物理量である。温度という実体がよく分からない量のことを知るには、熱と物質の理解が必要である。

中世の魔法を近代化学に変えたボイルは「近代化学の父」と呼ばれるが、ボイルから110年後に生まれ、化学物質や化学反応を研究、質量保存則を発見し、「酸素」を命名したアントワーヌ・ラヴォアジエ(1743～1794年、フランス)も同じく「近代化学の父」と呼ばれている。ボイルは、錬金術から化学の時代を切り拓いたが、ラヴォアジエは、燃焼における酸素の役割を明らかにし、それまでの化学の主流であった熱素(フロギストン phlogiston、「燃素」という和訳もある)が存在しないことを示し、化学を新たな段階に進めたため、近代化学の父と呼ばれている。それまでの化学では、燃焼とは、フロギストンという物質(元素)が放出される過程であると考えられていた。物が燃えると灰が残るが、それは物質からフロギストンが抜けるために起こる現象であるというのが定説であり、水素を発見したヘンリー・キャヴェンディッシュや酸素を発見したジョゼフ・プリーストリーもフロギストン説の信奉者であった。

しかし、ラヴォアジエは、燃焼とは、物質が酸素と結びつく反応であるという酸素説を提唱、フロギストンは存在しない架空の物質であるとして、これを完全に否定することに成功した。近代の科学には何度も大きな変革があったが、フロギストンが存在しないということは、当時の化学者にとって非常に大きなパラダイム・シフトとなった。

しかし、一方でラヴォアジエは、「熱」は物質であり、質量を持たない元素「カロリック」であるという概念を生み出してしまった(1777年)。燃焼に伴って放出

される元素「熱素・フロギストン」は消えたが、燃焼に伴って放出される熱のもととなる新元素「熱素・カロリック」がかわり、熱や温度の概念は、現在とは大きく異なったものになっていった。

多くの科学者がフロギストン説から脱却したが、今度は、カロリック説(熱素説, caloric theory) を認めることになった。カルノーサイクルで知られるニコラ・レオナルド・サディ・カルノー(1796~1832年、フランス)でさえ、基本的には、カロリック説を支持した。カルノーが考えた仮想の熱機関「カルノーサイクル」は、現在でも究極(到達はできないが最高)の熱サイクルとされているが、この時代、熱や温度の概念は、まだ現代のように確立されておらず、カルノーもカロリック説にどこか疑問を抱きながらも、それを信じて熱理論の研究を進めた。カルノーは、次第に「熱は物質ではなく運動である」とする「熱運動説」に傾いていき、自らも「火の動力」(1823年)を著したが、カロリック説を打ち破ることはできなかった。現在の周期表からは、質量を持たない元素の概念は、非常にわかりにくいものであるが、今から200年ほど前、熱は元素のひとつだと思われていたのである。

トマス・ヤングによって「エネルギー」という新しい概念が提唱された(1807年)。エネルギーの概念によって、活量論争という長年の何となくもやもやとした科学の論争が運動量と運動エネルギーとして整理された。ニュートン力学は、ガリレオ・ガリレイ、ヨハネス・ケプラー、ルネ・デカルト、ロバート・フックらの考えをまとめたものであり、質量、運動量、慣性などを定義した点が優れていたが、エネルギーの概念を取り入れることによってより洗練された理論となっていった。ユリウス・フォン・マイヤーやジェームズ・プレスコット・ジュールらによる熱の仕事当量の研究が行われ(1798~1862年)、次第に、「熱はエネルギーの一形態である」ということが明らかになっていった。熱もエネルギーの概念によって説明できるようになり、熱素・カロリックという元素は存在する必要がなくなった。後に作成された元素の周期表には、質量を持たない特殊な元素が含まれることはなかった。

ジョセフ・ルイ・ゲイリュサックが、シャルルの法則を定式化した時、「絶対温度」という物理量が定義された(1802年)。温度は、長さや重さのように、直感的に分かるものではなかったが、気体の容積は温度に比例すると定式化される物理量となった。

フロギストン説の否定、酸素の発見、カロリック説と続いた燃焼反応や熱の研究は、エネルギーと気体の分子運動の研究へと進み、「熱力学(thermodynamic)」によって熱と温度の概念が確立していった。

(2) 温度計 (thermometer)

一方、「寒暖」の感覚を表すようなものが古くから知られており、これが「温度」という尺度として現れてきたのは、比較的新しく、17世紀頃とされている。長さや重さといった物理量とその尺度が大昔から知られているのに対して、温度（温度目盛）の歴史は、非常に新しい。熱がまだ物質（元素のひとつ）だと思われていた時代に、温度という尺度や温度計という器具が考え出された。温度は、まだエネルギーとは結びつけられていなかったため、それを表わす尺度の大小や方向は、はじめから決まっていた訳ではなく、任意に決められていた。現在では、高温＝熱い、低温＝冷たいという、温度と寒暖の関係が常識となっているが、これも近代になって作られたものであって、初めからこのような関係がある訳ではない。温度という尺度は人間が考え出したものであり、高温＝冷たい、低温＝熱い、という温度目盛もかつては存在していた。

現在、科学的な温度を表わす単位は、熱力学温度ケルビン (K) である。これ以外で温度と呼ばれているものは、実用的に使いやすいようにと考えられた寒暖の尺度のようなもので、科学的温度ではない。

応用科学や工学の分野、気象や日常生活では、セルシウス度とファーレンハイト度という「温度」が頻繁に用いられている。温度の単位ケルビンは、温度とエネルギーを結びつけているのに対して、セルシウス度とファーレンハイト度は、温度と寒暖の関係を表す目安のような役割を果たしている。

セルシウス度とファーレンハイト度は、温度の変化や差を表わすことはできるが、熱やエネルギーといった概念とは整合性がないため、温度という物理量そのものを表わすことができない。この二つは、温度の単位 (unit) ではなく、温度の尺度 (scale) として使用されている。温度の単位には、値そのものに意味があり、他の物理量との関係も得られるが、温度の尺度の方は、値そのものには科学的な意味がない。したがって、桁数や何倍といった数字には全く意味がなく、条件（反応や感覚に対応する温度）や変化量（近距離での温度差や時間変化など）を示す時に用いられ、大小関係や差のみが重要となる。

温度の尺度として広く用いられているセルシウス度の場合、温度という概念を科学的に表していないだけでなく、常用域において、プラスとマイナスの値があるという使いづらいものになっている。尺度でありながら正負の符号が頻繁に変わるものは非常に珍しい。日本では、この半世紀ほどの間にセルシウス度が日常生活に広く浸透してきたために、プラスとマイナスの値があってもさほど違和感がなくなっており、マイナスという言葉も日本語になっている。

しかし、ガスを取り扱う熱力学では、科学的温度の概念が非常に重要であり、セルシウス度で示される「温度」は、必ず温度の単位ケルビンに変換しなければならない。ケルビンは、以前は温度の尺度とされたこともあったが、現在では物理量を表すひとつの単位として定義されている。ただし、ケルビンは、色温度（黒体から放射される光の色とその時の黒体の温度）と雑音温度（自由電子のブラウン運動に起因するノイズ）を表わす単位としても使用されており、熱力学温度にケルビンを用いるが、ケルビンそのものは熱力学温度だけの単位ではない。

現在、日本国内では、様々な場面で、「温度の尺度セルシウス度」と「温度の単位ケルビン」が混在し、両方が使用されている。深冷空気分離装置や超低温機器は、熱力学の様々な法則、熱サイクルによって作られており、その設計に使用される温度は、科学的な温度、熱力学温度である。ところが同じ装置の中でも、冷却水温や気温、常温以上の回転機、その他の補機類で外界との接点がある場合などでは、セルシウス度が使用されることが多く、一般的な運転盤、工業計器、その他のインターフェイスには、「℃表記」が多用されている。

気温や水温を熱力学温度で統一的に表わしても何の問題もないが、常温に近い機器では、顧客の要求や機器の仕様によってセルシウス度で示されることが多い。水温を 300 ケルビンと読むよりも 27℃と読むことによって気温との「差」が分かりやすいというメリットがある。

ケルビンという温度の単位とセルシウス度という温度の尺度が混在するのは、あまりよいことではないが、科学的な温度の概念が重要となる設計計算ではケルビンで統一し、図面や運転マニュアルなどは、使用者の慣れを優先して、適宜セルシウス度に変換して記載するといった使い方が多くなっている。

液体窒素の沸点も、大気圧付近であれば 77~80K であるが、外部への発表資料では、圧力 1atm の時の沸点をセルシウス度に換算した値「-196℃」が用いられることが多い。科学に興味がなく、ケルビンという単位を知らない人であっても、セルシウス度であれば感覚的に分かるだろうと考えて、-196℃という値が用いられる。ただし、純粋な液体窒素の標準的な大気圧 101.3kPa の時の沸点は 77.35K、セルシウス度では-195.8℃である。かなりの低気圧の状態、あるいは高い山に液体窒素を持ってこない、沸騰する液体窒素の温度が、-196℃まで温度が下がることはない。容器やタンクローリーの中にある液体窒素は、大気圧よりは高い圧力で保持されており、その温度も-196℃は高いはずである。数字が一人歩きしている-196℃は概略値である。

なお、液体窒素の温度は、一部の金属で低温脆性が起こるという意味では「低温工学」の範囲となるが、「低温科学」が、数 K 以下の超低温状態を取り扱うことと

比較するとかなりの高温である。物性の世界では、60K 程度の状態を利用する超電導技術は「高温超電導」と呼ばれる。一般の工業分野からみると、十分に低温だと思われる液体窒素も、科学の分野では高温と呼ばれることもあり、このあたりは、ガス屋としても使い分けが必要である。液体窒素の温度は、科学的には、低温（超低温）と呼べるほどの低い温度ではないが、工学的には「深冷、77K」と呼ばれ、広報、外部発表では、「かなりの低温、 -196°C 」と使い分けられている。

温度は、気体分子運動論やエネルギーに関わるものであるため、その概念や定義を正確に理解するのは難しい。しかし、人体の感覚（暑さや寒さ）や熱現象を温度と結びつけた概念は比較的古くからあり、18 世紀頃より、これを見えるようにするための「温度計」が考案され、尺度を表わすための「温度目盛り」が考えられるようになった。

高田誠二氏（1928～2015 年、通商産業省計量研究所、北海道大学名誉教授）が、解説記事、「温度概念と温度計の歴史」（日本熱測定学会、*Netsu Sokutei* 32 (4)162-168、2005 年）を著している。高田氏の解説を参考に、温度計の歴史を勉強したい。

史上初の温度計は、ガリレオ・ガリレイの気体温度計（1590 年頃）とされており、その後 18 世紀には、アルコール温度計と水銀温度計（液柱温度計）が考案された。本来の温度の定義は気体の法則（シャルルの法則）によるが、温度を測定するための材料（thermometric materials）には、気体や液体が用いられた。温度が上昇すると膨張するという気体や液体の性質を利用した温度計が考案された。

温度計には、目盛が必要であったが、目盛はひとつに定まることがなく、英国の G.マーチンという人が著した「温度基準一覧図（1751 年）」には、ファーレンハイト度、ド・ラ・イール度、アモントン度、レオミュール度、ド・リール度、ニュートン度、ファウラー度、ハイルズ度といった人名を冠したもの、フローレンス、パリ、エディンバラ、王立協会といった地名などがつけられたものなど、非常に多種類の温度目盛が記されている。この中では、ファーレンハイトとニュートン以外は、日本人にはほとんど馴染みのない名前ばかりであり、われわれがよく知るセルシウスやケルビンの名前はまだない。

ボイルの法則は 17 世紀中盤の 1662 年、シャルルの法則は 19 世紀初頭の 1802 年に公表された。温度が定義されたのはシャルルの法則以降であるが、二つの法則の間での 18 世紀中頃は、収拾がつかないほど多様な温度目盛が提案されていたということになる。先に、寒暖のようなものを表わす温度計が研究され、後からゲイ・リュサックによって温度の概念が定義されたという順序になる。

19 世紀になって、数多くあった温度目盛は収束に向かい、ファーレンハイト度と

レオミュール度と、この温度基準一覧図のときにはまだなかったセルシウス度を加えた3つの温度目盛りが主流となっていった。

日本の温度計は、欧州から伝わったものである。江戸時代中期の蘭学者、平賀源内(1728~1780年)が製作した温度計の目盛板には、日本語表記で、極寒、寒、冷、平、暖等の文字が記され、そのとなりには、数値も併記されており、その値から、その温度はファーレンハイト度であった推測されている(1765年、江戸幕府第10代将軍の頃)。また、江戸幕府が、オランダから購入し、幕末の箱館戦争(函館戦争)で沈没した軍艦が20世紀末になって引き上げられたが、そこに設置された温度計には、ファーレンハイト度とレオミュール度の二つの温度が併記されていたという。まだセルシウス度の痕跡がない。

日本には、温度(temperature)という概念も温度計(フランス語 thermomètre、1626年、英語名 thermometer)という道具もなかったが、幕末から明治時代にかけて、西洋から多くの文明が伝わり、その中にあった温度を測る道具(器具)に対しては、様々な日本語訳が考えられた。験温管、験温器、寒暑針など10種類ほどが作られた中から「寒暖計」という訳語が広まり(福沢諭吉)、西洋伝来の暑さ寒さを表わす計器は、約60年間、寒暖計と呼ばれた。

やがて科学の「温度」の概念が必要となり、第二次世界大戦中(1940年頃)には、温度を測る器具・寒暖計を「温度計」と呼び、と取り決められたため、寒暖計は温度計と呼ばれるようになった。その後、寒暖計という用語は、「人が感じることのできる範囲を計る(狭義の)温度計」と再定義され、現在もこの言葉が残っている。

日本で、温度を計る計器を温度計と呼ぶと決めたのは、比較的最近のことであり、まだ80年の歴史もないが、現在では温度計という言葉は広く定着している。水の温度=水温、空気の温度=気温などと、温度を温の一文字で表わすことも多く、用途によっては、水温計、油温計、体温計などと「度」という言葉を用いない温度計も多い。

なお、液体窒素、液体酸素やLNGなどを空気の熱で蒸発させて気化させる蒸発器(evaporator)のことを、産業ガス業界では「空温式蒸発器」と呼んでいるが、この場合の「空温 くうおん」とは「気温」「空気温度」のことではなく、「空気で温める」という意味である。水で加熱する蒸発器は「温水式」蒸発器と呼ぶ。空冷の反対は空温であるが、水冷の反対は温水(式)である。表にまとめておく。

表 2-2-2.冷却・加熱方式の呼び方

用語	意味	用途・使用例
水冷	水で冷却すること	水冷エンジン
空冷	空気で冷却すること	空冷エンジン
液冷	水溶液や潤滑油などで冷却	CPU ヒートシンク 油冷
冷媒 熱媒	温度を制御する媒体	チラー、冷凍機 油浴、湯浴、スチーム
温水	水を温めること	温水器（給湯器）
	水で温めること	温水式蒸発器、 温水暖房機
冷水	水で冷却すること	冷水塔
空温	空気で加熱すること	空温式蒸発器
気温	空気の温度	温度計、気温計
水温	冷却水などの温度	水温計、海水温
油温	潤滑油の温度	油温計
体温	体の温度	体温計
加熱	熱を与えること	加熱器、ヒーター
過熱	平衡温度を越え加熱	スーパーヒート
	熱しすぎる	オーバーヒート
冷却	温度を下げる	サブクール
過冷却	飽和温度との差	サブクール度
	平衡温度を越えた冷却現象	スーパークール
	冷やしすぎる	オーバークール

(3) セルシウス度 (degree Celsius)

日本では、いつから、セルシウス度が正式に使われるようになったのか、確かな記録はみつからないが、尺貫法、メートル法、ヤード・ポンド法などが混在したまま明治時代に制定された「度量衡法」が昭和時代に廃止され、新たに「計量法」となった時(1951年)に、その中には、セルシウス度が含まれていた。遅くとも20世紀の中頃には、セルシウス度が正式に法に定められていたようである。科学的温度は、絶対温度である熱力学温度(単位はケルビン)であるが、日本では、日常の温度目盛としてはセルシウス度が広く用いられている。気温、水温、体温、その他の分野でセルシウス度が用いられ、現在、日本語で、単に「度」というとほとんどの場合、セルシウス度である。

セルシウス度は、270年前に天文学者アンデルス・セルシウス(1701~1744年、スウェーデン)によって考案された(1742年)。セルシウスは、圧力が1気圧の時の、水の沸点を0度、凝固点を100度とし、その間を100等分した目盛を温度の尺度とした。現在のセルシウス度は、水の沸点を100度、凝固点を0度とし、その間を100等分しており、オリジナルのセルシウス度とは、逆の温度目盛である。

セルシウスは、通常の生活環境では、温度の値がマイナスにならないようにと考えて、温度目盛を考案した。スウェーデンのような北欧の寒い地域では、水の凝固点100度よりも温度が高く(寒く)なるため、セルシウス度は100度を越えるが、水の沸点0度よりも温度が低い(暑い)生活環境はないため、通常、マイナスの温度は現われない。セルシウス度は、寒い時に温度が高く(高温=寒い)、暑い時に温度が低い(低温=暑い)、温度目盛であり、水の沸点よりも冷たい範囲で用いられる温度の尺度とされたが、このような温度目盛はセルシウス度に限ったものではなく、ジョゼフ=ニコラ・ドリール(1688~1768年、フランス)が考案したドリール度も水の沸点を0度、凝固点を150度としていた。目盛りや尺度を考える時、ゼロはあってもよいが、マイナスはほとんど使われないとするのが普通の考えである。同じスウェーデンの著名な学者カール・フォン・リンネ(1707~1778年、スウェーデン)は、最も初めの頃からセルシウスの温度目盛に注目して、実際に温度計を製作させた。

ところが、セルシウス度は、セルシウスが亡くなった直後に、分割は100分割のまま、凝固点(氷点)をゼロ度、沸点を100度とする逆の目盛に変えられた(1752年)。セルシウスが創設したウプサラ天文台の資料によると、この変更は、天文台



図 2-2-2- アンデルス・セルシウス (1701~1744年) (Wikipedia)

後任者マルテン・ストレーマや温度計の製造業者のダニエル・エクストレームによるものであり、重要なのは温度定点を決めたことであって、スケールの方向はさして重要ではなかったとある。リンネが変えたという説もあったが、どうやらそうではないらしい。

セルシウス度は、当初、尺度としては不都合なマイナスの数値が現れないようにと考えられたものであったが、この変更によって、日常の使用でも頻繁にマイナスの値が現われる温度になった。図 2-2-3 にはセルシウス度と次に述べるファーレンハイト度を図示する。

単位や尺度、目盛りの中でマイナスとプラスの両方が頻繁に現われるものは非常に珍しい。セルシウス度は、熱力学温度（科学的な温度）や絶対温度ではないため、そもそも何倍、何桁といった科学的な取り扱いはできないが、無理矢理、 9°C を一桁、 10°C を二桁と読む人がいるが、 0°C や零下を表現する温度には「桁」が

ないため混乱する。途中でゼロがあるというのは、やっかいな目盛である。

0°C 以下の温度を表わす時には「零下〇〇度」と読む。「マイナス」は日本語ではないが、すでに外来語として日本語になっているので「マイナス〇〇度」も多い。

あるいは「氷点下〇〇度」と読む方法もある。氷点はちょうど 0°C ではないが、慣れるとマイナスの温度では水が氷になるだろうという直感が働きやすい。

なお、セルシウス度は、当初は、100 分割という意味で、「百分度」(centigrade)と呼ばれたこともあるが、国際度量衡総会 (1948 年)において、正式に「セルシウス度」と呼ぶことになっている。英語の口語表現にしばしば見られる「センチグレード」は、温度を表わす学術用語ではない。

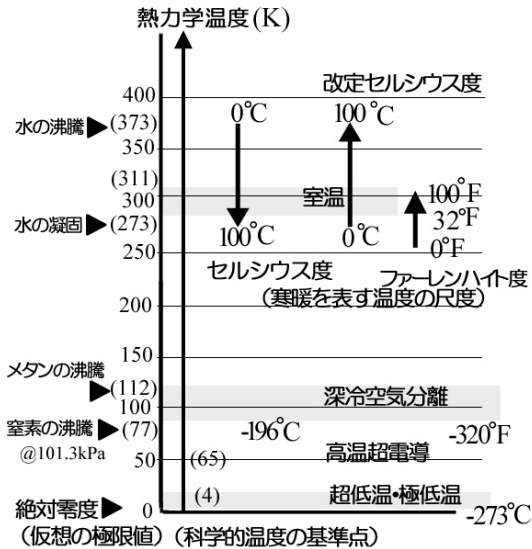


図 2-2-3-セルシウス度、ファーレンハイト度と熱力学温度の関係

(4) ファーレンハイト度 (degree Fahrenheit)

米国などで使われるファーレンハイト度 ($^{\circ}\text{F}$) は、水の凝固点を 32 度、水の沸点を 212 度として、その間を 180 分割する温度目盛りである。

地球上の居住可能範囲の環境は、ほぼ、 $0\sim 100^{\circ}\text{F}$ の間に入り、ほとんどの生活圏で、ファーレンハイト度にはマイナスがない。通常の生活範囲では、マイナスの値がでないようにとしたという点では、オリジナルのセルシウス温度と考え方は同じであるが、寒い時に温度が低く、熱い時に温度が高いという目盛りの向きは、セルシウス度 (オリジナル) やドリール度とは逆である。

ガブリエル・ファーレンハイト (1686~1736 年、プロイセン) は、アルコール液柱温度計の不正確さを排除するために、純度の高い水銀を使用して温度測定の精度を高め、温度計を用いた様々な研究を行った。

ファーレンハイトは、液体の沸点を計測、沸点が液体の種類によって異なること、大気圧によって沸点が変化すること、液体を混合するとその温度は合計した平均温度にならないことも発見。今では当たり前のように知られているこれらの現象は、ファーレンハイトの正確な温度計を用いた実験によってはじめて明らかにされた。ファーレンハイトは、また、過冷却水 (supercool) の震盪凝固現象も発見している。

ファーレンハイトが、温度目盛りを考える時に参考にしたレーマー度は、水の沸点を 60 度、凝固点を 7.5 度にしていたため、頻繁にマイナスが現れるという不都合があった。そこで、ファーレンハイトは、マイナスの温度を避けながら「水と氷が共存する温度と健全な男性の体温を固定点とする温度」を考案することにした。この体温とは、おそらくファーレンハイト自身の体温であったと考えられているが、現在の標準からはやや高い。

ファーレンハイト度 (1724 年) は、生活密着型の温度であり、ヒトの体温が 100 度 ($^{\circ}\text{F}$) になるように考えられたが、その後の調整の結果、一般的なヒトの体温 (平熱) は 98.6 度 ($^{\circ}\text{F}$) (37.0°C) とされているため、体温が 100 度 ($^{\circ}\text{F}$) (37.8°C) 以上では要治療と考えられるようになっている。

気温は 30 度 ($^{\circ}\text{F}$) (-1.1°C) でかなり寒く、50 度 ($^{\circ}\text{F}$) (10°C) で涼しく、80 度 ($^{\circ}\text{F}$) (26.7°C) で暑く、100 度 ($^{\circ}\text{F}$) は体温よりも高い危険な猛暑である。セルシウス度に慣れている日本ではよく分からないが、これが、季節の寒暖や人の体感にあうように考えられたファーレンハイト度の温度目盛りである。22 度 ($^{\circ}\text{F}$) は氷点下 10 度であり、氷が張っても、まだマイナスにならない。0 度 (-17.8°C) は、



図 2-24 ガブリエル・ダニエル・ファーレンハイト (1686~1736 年)

冷凍庫のような低温であるため、極寒地以外の通常の生活環境では、マイナスは現れない。現在、ファーレンハイト度を公式に使用しているのは、アメリカ合衆国とカリブ海の諸国（ジャマイカ、バハマ、ケイマンなど）に限られており、大半の国がセルシウス度を採用している。セルシウス度はメートル法とは関係ないが、SI では特別な尺度として認められており（熱力学温度と温度幅が等しい）、セルシウス度の方が世界標準になっている。ファーレンハイト度は、セルシウス度を常用する日本ではなじみがないので、32 度で水が凍り、体温が 100 度だと熱があるとすれば、何となく覚えることができる。

(5) 温度目盛のまとめ

ルネ・レオミュール（1683～1757 年、フランス）が、レオミュール度（°Ré）を考案、定点は水の凝固点を 0 度とした（1730 年）。氷点で体積 1000 のアルコールの体積が 1 上がる毎に 1 度加えることにしたところ、水の沸点では 80/1000 となったため、結果的に氷点が 0 度、沸点が 80 度の温度目盛となった。セルシウス度は定点が 2 つで分割数が 100、レオミュール度は、定点がひとつしかなく、目盛の分割は行われていないが、結果的には 80 分割に相当し、レオミュール度と改定後のセルシウス度はよく似た温度目盛になっている。

レオミュールは、数学者、昆虫学者であったが、様々な実学にも興味を持ち、木材からパルプが作られること、貝が真珠を生成することなどを発見、アルコール温度計を作って、温度目盛レオミュール度を考案した。

数多く乱立した温度目盛のうち、ファーレンハイト度（1724 年）、レオミュール度（1730 年）、セルシウス度（1742 年）、という 18 世紀前半に考案された 3 つの温度が残り、現在は、大半の国でセルシウス度が、一部の国でファーレンハイト度が使用されている。なお、セルシウス度（または温度）を「摂氏・せし」、ファーレンハイト度（または温度）を「華氏・かし」、レオミュール度を「列氏・れっし」と書くが、これらは、温度目盛の考案者の名前の中国語表記に由来している。漢字表記は、セルシウス（摂爾修斯、摂尔西烏斯）、ファーレンハイト（華倫海特、華連歌乙）など様々であるが、日本語の日常会話では、セルシウス度を使う時は、「摂氏」を使い「せっし〇〇度」と読むのが一般的である。

現在、最も多く用いられている温度は、熱力学温度ケルビン、セルシウス度、ファーレンハイト度の 3 つであるが、これらの温度あるいは温度目盛は、全て、寒い（エネルギーが小さい）方が値が小さく、熱い（エネルギーが大きい）方が値が大きい。「高温＝暑い、熱い」、「低温＝寒い、冷たい」が標準となった。高温というのが暑いという意味を持ち、低温というのが寒いという意味を持つようにな

ったのは、近年になってからの話であって、はじめから温度目盛がそのようになっていたのではないということである。

日本語の「深冷」には、「冷たい」という言葉が入っているが、「超低温」には冷たいという言葉はなく、「低い温度」という高低の尺度が入っている。もし、逆方向の温度目盛りの方が普及していたなら、超低温、"very low temperature" は、別の単語になっていたのかも知れない。セルシウス度にはマイナスが現われてしまったが、残った温度全てが同じ方向の目盛を持ち、エネルギーの大小が温度の高低に対応し、高温、低温の意味がどれも同じであるということは、非常に都合がよい結果となった。

表 2-2-3-主な温度目盛

温度	提案者	温度計	定義定点	備考
ニュートン度 1700年	アイザック・ニュートン	亜麻仁油	氷点 0 水の沸点 33	測定器を thermometer (温度計) と名付けた
ファーレンハイト度 1724年	ガブリエル・ファーレンハイト 科学機器製作者 物理学者	アルコール 水銀	水・氷・塩化アンモニウムの寒剤による最低温度 0、ヒトの血液温度 96	ファーレンハイトによると、0度は「この世の最低温度」、100度は自分の体温
レオミュール度 1730年	ルネ・レオミュール、 金属学、昆虫学者	アルコール	氷点 0	結果的に水の沸点が 80 度となったが定点は氷点のみ。
ドリール度 1732年	ジョゼフ＝ニコラ・ドリル、 天文学者	水銀	氷点 150 水の沸点 0	低温は熱い状態
セルシウス度 1742年	アンデルス・セルシウス、 天文学者	水銀	氷点 100 水の沸点 0	2 つの定点を 100 分割。低温は熱い状態
改定セルシウス度 1752年			氷点 0 水の沸点 100	セルシウス度の温度を逆転。 低温は冷たい状態
絶対温度 1802年	ジョゼフ・ルイ・ゲイ＝リュサック、 気体の研究者	シャルルの法則	絶対零度の概念	寒暖とは関係のない科学的温度
熱力学温度 1954年	W.トムソン	気体分子運動論	ゼロは絶対零度。目盛はセルシウス度	1848年に W.トムソン(後のケルビン卿)が提唱。

(6) 絶対温度と熱力学温度

日本の天気予報では「氷点下マイナス〇〇度」「零下〇〇度」といったセルシウス度独特の表現がある。水の融点（凝固点）は、 0.002519°C であるから、「氷点下」と「マイナス温度」は、一致していないが、氷点は、ほぼ「プラスマイナスゼロ度」に近いとしてこの表現が用いられている。「明日は暖かく、気温は二桁になるでしょう」「寒くなるので二桁に届かないでしょう」などといった天気予報を耳にすることがあるが、温度の桁といってもピンとこない。温度は分子運動から定義され、空気の分子運動のエネルギーを 9°C と 10°C で比較すると、0.35%しか変わらず、 1°C と 10°C でも、3%の違いしかない。セルシウス度の数字が一桁から二桁になっても、温度は「桁違い」ということにはならないのは、セルシウス度が科学的な温度目盛ではないためであり、

理想気体のシャルルの法則で「温度が2倍になると圧力が2倍になる」という説明を行う場合、 10°C から 20°C になっても圧力は2倍にならない。セルシウス度の数値にも科学的な意味があると考えてしまうと、 0°C を2倍は何度？、マイナス 10°C の2倍は何度？、 0.5°C は何桁？、マイナス 20°C は何桁？といった疑問には答えがない。セルシウス度の基準となるゼロの位置が、熱力学とは全く無関係であるため、シャルルの法則に示された物理量「温度」としては使えないのである。セルシウス度が表すのは温度の尺度・目盛であって、温度そのものではなく、したがって、科学的な温度の意味を持たないため、差あるいは変化量だけが意味を持つことになる。図2-2-3からもセルシウス度の桁には意味がないことがよく分かる。

温度が、物理量、熱力学的状態量としての意味を持つには、セルシウス度のような水の物性を利用した基準点ではなく、絶対零度を起点とした「絶対温度 (absolute temperature)」が必要である。絶対温度という概念は、ゲイ=リュサックによってシャルルの法則が示された時に導入され、その時に絶対零度の概念も示された(1802年)。気体の研究と温度の関係は古いが、この温度を実際に「絶対温度」という名称で呼ぶようになったのは、ジェームズ・マクスウェルの「気体の分子運動論」(1861年)からである。

量子論の父マックス・プランクは、著書『Vorlesungen über Thermodynamik, 1897年初版、熱力学講義』の第8版(1927年、邦訳は芝亀吉訳『熱力学』岩波書店、1941年)で、温度は何かということ次のように説明している。(高田誠二氏の解説記事における説明)

「科学的に用いることができる定量的尺度は直接の感覚からは導かれぬ」、「温度の定義の任意性は依然として除かれぬ」、「個々の物質の性質に無関係な温度

の定義は熱理論の第二主則(熱力学の第2法則)を基礎として初めて可能となる」、「それまでは、気体寒暖計によって、十分な精密さを以て、定義せられる様な程度の温度のみを問題とする」。

プランクによると、温度は、冷温という感覚から離れ、科学的に定義されなければならず、シャルルの法則以来の絶対温度は、マクスウェルの気体分子運動論の時代を経て、熱力学第二法則を基にして初めて定義が可能ということである。科学としての温度の概念が確立されてからまだ100年ほどしかたっていない。

絶対温度は、現在では、熱力学で定義される温度として「熱力学温度(thermodynamic temperature)」と呼ばれる。ただし、「絶対零度」を基準としているため、現在でも絶対温度と呼ばれることがある。少々ややこしいが、絶対温度は一種類だけではないため、絶対温度イコール熱力学温度ではないが、ほぼ同義に用いられることが多い。

絶対零度を基準とする絶対温度では、温度の比が意味を持つ。たとえば、気体の比熱を一定とした時、(セルシウス度で)1°Cの気体のエネルギーを2倍にすると、温度は2°Cではなく275°Cになるのに対して、絶対温度、100Kの気体のエネルギーが2倍になると温度は200Kになり、274K(1°C)の2倍は548K(275°C)となるので分かりやすい。

はじめは、暖かいとか冷たいといったヒトの感覚を表すために作られた温度計や温度目盛りは、絶対零度という基準と気体の分子運動論によって、はじめて絶対温度という科学的な意味を持つようになった。

ただし、ゲイ=リュサックがシャルルの法則を定式化したときには、「絶対零度は分子が動かない状態」であると考えたが、この古典力学的な説明は、現代の科学である量子力学的には破綻している。量子力学における不確定性原理によって、最もエネルギーが低い状態の物質にも振動があり、零点エネルギーがある。絶対零度そのものは、「実現不可能な温度」である。

人工的に作られた低温状態には、より絶対零度に近い温度があり、mK(ミリケルビン)や μ K(マイクロケルビン)などの単位で表される温度もあるが、現在の宇宙の平均温度は2.7K、観測された最も低い温度は1K程度(ブーメラン星雲)である。自然界の低温よりも実験室において達成された低温の方が温度が低い。

絶対零度は、理論上、到達不可能な極限の仮想の温度である。熱力学では、絶対零度以下の温度は定義されず、エネルギーの大きい方へ向かって数値が大きくなるように定義されており、絶対温度は全てプラスの値を持つ。もし新聞に「絶対零度達成」などという記事が載れば、それは科学の根底を揺るがすほどの大発見ということになる。

絶対温度には、目盛の取り方によって3つの温度、ランキン度 ($^{\circ}\mathbf{R}$)、ケルビン (\mathbf{K})、プランク温度が知られている。

「ランキン度」は、絶対零度を起点とし、温度の刻みをファーレンハイト度と同じとする絶対温度である。クラウジウス、ケルビンなどと並ぶ熱力学の創始者ウィリアム・ランキン (1820~1872 年、スコットランド) に因んでいる。ランキン度は、ファーレンハイト度に約 460 度を加えた値となるが、現在はファーレンハイト度を使う国々であっても、ケルビンを使うことが多く、ほとんど使用されていない。ランキンの名前は、熱力学のサイクルであるランキン・サイクルが広く知られ、石炭火力発電や原子力発電に使用されるランキン・サイクルは、現在の世界の電力量の大半を供給している。われわれが、電気を用いた便利な文明を享受できるのは、ほとんど、ランキン・サイクルのおかげである。

プランク温度は、プランク単位系の温度であり、光速度、ディラック定数などから定義される温度である。ケルビンとの換算は、 $1T_p=1.417\times 10^{32}\mathbf{K}$ 。1 プランク温度は、プランク時代 (ビッグバン後 10^{-44} 秒後の世界) の温度であり、1 プランク温度より高い温度は知られていないため、全ての温度は $0\sim 1$ の間の値をとる。理論物理以外では用いられていない。

「ケルビン」は、絶対零度 (absolute zero) を起点としてセルシウス温度目盛と同じ温度間隔を用いる絶対温度の単位である。現在、熱力学温度というと、このケルビンのことを指すのが一般的であり、ランキン温度とプランク温度を考える必要はないので、熱力学温度ケルビンと絶対温度は、ほぼ同義と考えてよい。

W.トムソンは、論文"On an Absolute Thermometric Scale" (「絶対温度目盛りについて」、1848 年) で、絶対零度 (W.トムソンは"infinite cold"と呼んだ) を目盛のゼロ点とし、温度間隔はセルシウス度と同じとする温度目盛を提唱した。氷点における空気の膨張率 $0.00366/^{\circ}\mathbf{C}$ から、絶対零度は、この逆数 $-273.3^{\circ}\mathbf{C}$ に相当すると推定されていた。ゲイ=リュサックが絶対零度を定義した時、まだ空気は液化されていないが、空気にシャルルの法則を適用して外挿すると、おおまかに絶対零度がこのくらいだということが予測できる。膨張率が温度によって変化せず、(液化せずに) 空気を冷却していけると仮定すると、 $1^{\circ}\mathbf{C}$ あたり 0.0036 ずつ縮んでいくので、マイナス $273^{\circ}\mathbf{C}$ あたりで、ほぼ体積がゼロになるので、絶対零度はだいたいこのあたりにある。その値は、 $-2473.15^{\circ}\mathbf{C}$ という現在の値と大きくは異なっていない。

熱力学温度を決める時に、その目盛を水の物性と結びつけられたセルシウス度のようなものに依存するのではなく、これとは無関係に温度目盛を決めてもよかったのかも知れないが、熱力学温度のケルビンの目盛は、セルシウス度の目盛と全

く同じものが用いられた。これは、前述の高田氏によると、熱力学温度の概念の立役者である W.トムソンが、セルシウスの伝統を尊重しすぎたためであり、その結果、多くの研究者が氷点の熱力学温度を求めることに苦労したとある。熱力学温度の目盛の定義には、気体温度計を用いればよいと思われたが、トムソンがセルシウス度に固執したため、「水」の物性を研究しなければならなかったということである。

なお、熱力学温度の制定には「ケルビンが大きく貢献した」との記述が多いが、W.トムソンがケルビン卿の名前を得るのは、この論文から 44 年も後の 1892 年であり、熱力学温度が研究されていた期間、ケルビンの名前は無い。熱力学温度の研究に貢献したのは、トムソンである。

W.トムソンの論文から 106 年後、1954 年の第 10 回国際度量衡総会 (CGPM) において、「ケルビン」が熱力学温度として正式に採択された。ただし、この時は、単位ではなく、「ケルビン度」「°K」(度 K) という温度の尺度であった。その後、CGPM1967 年の総会では、これを温度の尺度ではなく、「K」(ケルビン) という名前の物理量の単位 (測定の単位) とすることが決められた。ケルビン以外の温度目盛には、度 (degree) という尺度が用いられ、それぞれ、°C、°F、°R と表記されるが、ケルビンには、度という尺度が使われない。

注意しなければならないのは、国際的に、熱力学温度が「°K 度」と呼ばれたのは、1954~1967 年のわずか 13 年間しかないにも関わらず、古い書籍やその後の書籍、論文でもしばしば「°K」使われていたということである。現在、「°K」という表記は完全な誤りであるが、他の温度が「度」を用いるため、これと混同された「°K 度」が「K」(ケルビン) が制定後もよく見られた。「K」と「°K」は意味が異なるので、古い教育を受けた世代は注意が必要である。

なお、様々な場面で、大文字の K が単位に使われることがあるが、SI で用いられる大文字の K が使用されるのは、このケルビンだけであり、Kg や KWなどを単位記号として使用するの、全て誤りである。日本の JIS や計量法も基本的には SI に準拠しているため、ケルビン以外で K (大文字の K) を使うのは、ルール違反ということになる。

低温では mK (ミリケルビン) という単位も用いられるが、「m」はメートル (長さ) とミリ (接頭辞) の両方に用いられるため、紛らわしくならないようにミリとケルビンは間を空けずに表記、メートルとケルビンを続けて書くときには中黒 (数学のドット演算子) を打つ。例えば、熱伝導率の単位は $W/(m \cdot K)$ 。

CGPM で、決められたケルビンの定義は、「水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ 」である。以前は、セルシウス度からケルビンが定義され、セルシウス度 t と熱力学温度 T の関係は、 $T = t + 273.15$ となっていたが、現在は、ケルビンからセル

シウス度が定義されている。 $t = T - 273.15$ 。

また、水の三重点を定義するために用いられる水の組成については、超純水であるというだけでなく、水素に対する重水素の比 155.76ppm、酸素 16 に対する酸素 17 の比 379.9ppm、酸素 18 の比 2005.2ppm と同位体比も非常に細かく決められている。

なお、セルシウス度は、SI ではないが、熱力学温度 K と全く同じ目盛を持つため、SI において特別な扱いを受けるようになり、「セルシウス度は、ケルビンの特別な名称」と決められている。これは、「ケルビンとセルシウス度は、起点は異なるものの、単位としては同じものである」ということを示しており、「1K の温度差と 1°C の温度差は全く同じもの」である。

非常に多くの種類があった温度の目盛は、国際的には、ケルビンという単位に一本化され、その定義も厳密なものとなった。気体の熱力学温度を T とすると、ボルツマン定数によってエネルギーに換算される。 $E = kT$ 。これは、古典的に振る舞う系のミクロな粒子によって運ばれる熱エネルギーを表している。次の SI の改定では、ボルツマン定数 ($k=1.3806488 \times 10^{-23}$ J/K) を固定して、これからケルビンを定義するという定義の変更が予定されている。

(7) 国際温度目盛

ゼロ点やケルビンの定義を理論的に決めることはできるが「熱力学的な間隔」として使用できる目盛を、広い温度領域で正確に求める作業は簡単ではない。

水の三重点の熱力学温度の $1/273.16$ を 1K と定義しても、たとえば 77K と 78K の温度の間、300K と 301K の温度の間で、それぞれ 1K を正しく決める必要がある。水銀柱やアルコール温度計を等間隔に分割しても、それは温度計の指示の「長さ」を等間隔にしたのであって、温度を等間隔にしたことにはならないからである。

温度そのものは、分子運動から定義されなければならないが、実際の温度の測定には、様々な物質の物性や物理現象を用いた「温度計」が用いられている。

一次温度計と二次温度計があり、一次温度計は、体積、物質質量、圧力から実在気体の状態方程式を用いて熱力学的に求めるため、「校正」の必要がないが、実際の作業は簡単ではなく、実用的な温度計にはならない。

二次温度計は、温度に依存する何らかの法則、物性を用いて測定するため精密な校正が必要である。温度測定の仕組みは、たとえば電気抵抗や線膨張率などを利用するため、これらの物性を利用して測定された温度が、より熱力学温度に近くなるような、取り決めが必要である。実用上の温度は、「国際温度目盛 (ITS, The International Temperature Scale)」によって決められている。

最新の温度目盛は、ITS-90 と呼ばれる 1990 年制定のものである。ITS では、温度の測定方法が、温度領域によって決められており、ヘリウムの蒸気圧、ヘリウムの気体温度計、白金測温抵抗体、放射温度計などが用いられている。温度定点には、平衡水素の三重点、ネオンの三重点、酸素の三重点、金の凝固点などが決められており、定点における物性から温度が定義される。

これらの定点の間をつなぐ目盛りは、たとえば温度計が測温抵抗体の場合、使用される金属の組成が指定され、非常に複雑な温度—抵抗値の関数が与えられる。関数は、熱力学的に温度が等間隔になるように取り決めるのが目的であり、関数形には特に意味がない長い多項式となる。これらの温度計による温度測定は、正確な再現性が考慮されているため、極めて高価な測定システムとなり、工業装置には実用上使えないが、一次標準温度計として重要である。高温の温度測定の誤差に比べると低温の温度測定の誤差の方が物性などに与える影響が大きいので、低温の物性や深冷空気分離装置の基礎研究では、非常に精密な温度測定が必要となり、一次標準となる高精度の温度計測システムが必須設備となる。

以前の温度目盛には「1968 年国際実用温度目盛」 IPTS-68 があり、定義定点などが ITS-90 とは異なっている。実用上は、大きな差ではないとされているが、厳密には、物性の測定値に影響があり、水の標準沸点は 100°C から 99.974°C に変わっている。したがって、物性のデータベースを評価する時には、新旧の温度目盛の違い、得られた物性値が、いずれの基準の温度に基づくのかということに注意しなければならない。

(8) ITS-90 The International Temperature Scale of 1990

ITS-90 は、国際ケルビン温度 T_{90} と国際セルシウス温度 t_{90} を定義し、その範囲は、 0.65K から単色放射温度計で測定が可能な高温までである。国際ケルビン温度と国際セルシウス温度は次式で定義する。 $t_{90} = T_{90} - 273.15$

ITS-90 では、いくつかの温度領域とその中の小さな領域から構成されているが、いくつかの温度領域は重なっているため、非常に高精度の測定では、同じ温度であっても異なる定義が存在し、異なる値を示すことがある。この差は事実上無視できる差であり、両方が正しいとされる。ITS-90 の温度 T_{90} は、熱力学温度 T を直接測定するよりも容易であり、 T_{90} は T の非常によい近似になっている。

- 0.65K から 5.0K の間の T_{90} は、 ^3He と ^4He の蒸気圧と温度の関係から定義される。
- 3.0K から 24.5561K (Ne の三重点) の間の T_{90} は、3 つの定義定点と定められた補間手続きで定義される。

- 13.8033K（平衡水素の三重点）から 961.78°C（銀の凝固点）の間の T_{90} は、定められた補間手続きを用いて、規定された組み合わせの定義定点で校正された白金抵抗温度計で定義される。
- 961.78°C以上の T_{90} は、ひとつの定義定点とプランクの放射則を用いて定義される。

定義定点に用いられる物質は、ヘリウム、平衡水素、ネオン、酸素、アルゴン、水銀、水、ガリウム、インジウム、すず、亜鉛、アルミニウム、銀、金、銅であり、三重点あるいは融点が利用され、 ^3He を除くといずれも同位体比は地球の天然存在比を参考にしている。

定められた手順の中には、補間式の詳細とそこに使用される係数、有効数字が細かく指示されている。

最もよく用いられる、13.8033K～961.78°Cの間の T_{90} は白金抵抗温度計（白金測温抵抗体を用いた温度計）で定義されるが、ひとつの温度計でこの範囲を全てカバーすることはできず、測定範囲に応じて抵抗体の材質や測定方法が規定されている。

使用できる白金抵抗温度計は、純粋で歪のない白金で製作され、次の条件のいずれかを満足する必要がある。 $W(29.7646^\circ\text{C}) \geq 1.11807$ 、 $W(-38.8344^\circ\text{C}) \leq 0.844235$ 、ここで、抵抗比 $W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16\text{K})$ 。指定温度における抵抗体の抵抗値と水の三重点における抵抗値との比 W が、決められた条件を満足すれば T_{90} の測定に使用できる。白金抵抗温度計を用いる実際の温度の測定では、基準関数 $W_r(T_{90})$ との偏差関数 $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ が与えられ、基準関数も温度領域に応じて非常に細かく定義されている。

熱力学温度の測定に比べて、実用温度計による温度の測定は簡便とされるが、ITS-90 が定める実用範囲における温度の定義は、非常に精密な装置と複雑な計算を必要としている。

国際度量衡委員会では、これまでに 3 回、温度目盛を決めている。1968 年の IPTS-68（国際実用温度目盛）と 1976 年の EPT-76（1976 年暫定目盛）と ITS-90（国際温度目盛）である。これらの温度目盛は、明らかに差異があるが、定義が異なるため、簡単な変換ができない。そこで、過去の物性データなどと比較するために温度の変換のための近似式が与えられており、たとえば、13.8K～83.8K の間の T_{68} と T_{90} の変換は、13 次の多項式で与えられ、83.8K～630.6°Cの間では 8 次式で与えられている。近似式とはいえ、かなり細かい。

温度の測定には、白金の抵抗やヘリウムの蒸気圧などの物性が使用されるが、これらの物性は複雑な温度の関数であり、純度などの条件が確保されなければ再現

性が保たれない。国際的に温度目盛り信頼されるように、国際度量衡委員会では、非常に詳細な手順を決めている。

日本では、産業技術総合研究所の計量標準総合センター(NMIJ, National Metrology Institute of Japan、旧工業技術院計量研究所)が温度計測や温度標準の研究を行っている。

(9) 工業装置における温度の測定

①実用的な現場の温度計

国際温度目盛りは、厳密な熱力学温度よりは実用的であるが、非常にハードルが高く、実際の工業用の機器には使用ができない。さらに簡便な工業用の温度計が必要である。

工業装置で必要とされる温度の測定は、それほど高い精度を要求しない。深冷空気分離装置では、およそ0.1Kの温度の精度があれば十分である。実用化されている主な温度計には、熱電対、抵抗温度計(測温抵抗体、サーミスタ)、非接触温度計(赤外線)、液柱温度計(アルコール、水銀)、バイメタル式温度計などがある。

この場合の「精度(precision)」とは、長期間にわたって比較的安定した再現性があるということであって、厳密な「確度(accuracy)」までを要求しているものではない。絶対値としての温度が正しく測れるのが理想的であるが、実用的な使い勝手、コスト、メンテナンスを考えると、真値(定義値)に近いことよりも再現性が高いことの方が重要なことが多い。厳密な物性値の推算には確度が重要であるが、実用上は精度が必要であり、装置の中の状態の変化を正しく知るためには温度計が安定していなければならない。ある日計った77Kという温度が、翌日には77.1Kと表示されるようでは困るのである。

深冷空気分離装置の温度範囲は、低温装置から室温に置かれる圧縮機まで、およそ80Kから400Kの間にある。プラントの運転、監視には、圧力、流量、製品の純度などが重要である。深冷空気分離装置の蒸留塔の温度は管理するものではなく、測定する必要もないが、熱交換器の性能が維持されていることの確認が重要であるため、出入りする流体の温度は、正確に測定される必要があり、他の工業装置に比べると比較的低温の領域で温度測定が行われる。ただし、低温とはいつても、液体ヘリウムを用いる超低温に比べると80Kはかなりの高温であるため、特殊な温度計を用いる必要はなく、一般的な(低温用の)工業計器が使用される。

②熱電対温度計

低温領域で用いられる比較的簡単な温度計としては、異種金属接合を用いた熱電対 (thermocouple) があり、実験室などでは、様々な種類の熱電対温度計が使用されている。

熱と電気の間には、熱エネルギーと電気エネルギーが相互に影響をおよぼし合う熱電効果 (thermoelectric effect) があり、その中でもゼーベック効果 (1821年)、ペルティエ効果 (1834年)、トムソン効果 (1854年) がよく知られている。

熱電対温度計は、トーマス・ヨハン・ゼーベック (1770~1831年、エストニア) が発見したゼーベック効果を用いる温度計である。異なる金属 (または半導体) をつなぎ、2点に温度差をつくると、温度差が電圧に変換され、これを熱起電力と呼ぶ。

各物質の電位はゼーベック係数で表わされ、ゼーベック係数の差を2つの温度の間で積分すると回路の電圧が得られ、この電圧 (熱起電力) から温度差を求めることができる。熱電対では、温度は測定できないが、電位差に応じた温度差が測定できるので、一方の点の温度が既知、例えば水の凝固点であれば、電位差から氷点との温度差が得られ、もう一方の測定点の温度が得られる。熱電対温度計は熱起電力を利用して温度差から温度を知る温度計である。

熱電対温度計には、金属の組み合わせによって、次のようなものが知られている。

K 熱電対 (クロメル・アルメル)、 $-200\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 、E 熱電対 (クロメル・コンスタンタン)、 $-200\sim 700^{\circ}\text{C}$ 、J 熱電対 (鉄・コンスタンタン) $0\sim 600^{\circ}\text{C}$ 、T (銅・コンスタンタン)、 $-200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 、R 熱電対、S 熱電対 (白金ロジウム・白金) $0\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 。測定する温度の範囲、精度、コストなどを考慮して選択される。

ニッケルとクロムを中心とした合金は、電気抵抗が大きく、電熱線の場合はニクロム線やカンタル線の名前で知られ、熱電対に使用される場合は、クロメルと呼ばれる。アルメルはニッケル、マンガン、アルミニウム、ケイ素などの合金であり、クロメル・アルメルの組み合わせた熱電対は、温度差あたりの起電力が大きく、広い範囲でほぼ一定である。(ニクロム、カンタル、アルメル、クロメルはいずれも登録商標)

コンスタンタンは、銅とニッケルの合金で、電気抵抗の温度係数が小さく熱起電力が小さいため、銅や鉄などと組み合わせて使用される。

JIS の規格外では、 2500°C 近い温度まで計ることができるタングステン・レニウム合金の熱電対 (異なる組成の合金を組み合わせ) や IK の低温まで計ることができるニクロム-金鉄熱電対などがある。

補足 2-13：三つの熱電効果

①ゼーベック効果（1821年）

異なった2種類の金属導線を用いて閉回路を作り、2つの接点を異なる温度に保つと両接点間に起電力が生じ、回路に電流が流れる。これをゼーベック効果（Seebeck effect）と呼ぶ。金属内では熱の流れに応じて自由電子が高温端から低温端へ移動する。低温端に電子が溜まると、金属内には電位勾配が生じ、これを熱起電力（thermoelectric electromotive force、略して thermal emf）と呼ぶ。

熱電対（thermocouple）はゼーベック効果を利用した温度計であり、実際の温度の測定では電流が流れないようなブリッジ回路を作り、読み取った平衡電位差から、温度差を求める。1つの接点の温度が既知であれば、もう1つの点の温度を知る（測温する）ことができる。

ゼーベック回路を高温熱源と低温熱源を持つ可逆的熱機関とみなすと、熱起電力は温度差に比例することになるが、広い範囲ではほとんど比例していない。（トムソン効果などによる）

②ペルティエ効果（1834年）

ペルティエ効果はゼーベック効果の逆効果である。ゼーベック効果と同じような2種類の金属導線をつないだ閉回路に電流を流すと、両端の温度は異なる温度になる。金属対の熱起電力による温度による変化率（熱電能）の係数と電流の係数が重要となり、接点におけるペルティエ係数として評価される。一般的にペルティエ係数は非常に小さく、ペルティエ効果による発熱や吸熱は、導体の抵抗によるジュール熱に比べて非常に小さい。

③トムソン効果（1854年）

1本の導線の一部に温度勾配を作り、これに電流を流すと電流と熱流が同じ方向の点では発熱が起こり、逆の方向の点では吸熱が起こる。これをトムソン効果と呼ぶ。ウィリアム・トムソンが発見した。

トムソン効果はペルティエ効果よりも小さいが、実際のゼーベック回路において起電力が発生する時、ゼーベック効果（ペルティエ効果）だけでなく、トムソン効果、ジュール熱、放熱による損失などが加わっていることなどから、起電力は温度差に比例しないことになる。

②抵抗温度計

熱電対は、手軽で精度がよく、測定範囲の広い温度計であるが、大型の装置では、使いにくい。熱電対金属の材質の経年劣化、補償導線の品質管理、端子部の温度勾配（空気の流れ）、冷点（比較用の冷接点温度）の管理を考慮しなければならず、長距離の伝送や長期間のメンテが難しい。大型の装置では、熱電対よりも抵抗温度計の方が使いやすい。

温度 $t^{\circ}\text{C}$ の時の固体の電気抵抗 R_t は、次式で示される。

$$R_t = R_0 \left(1 + \int_0^t \alpha_t dt \right)$$

R_0 は温度 0°C の時の電気抵抗、 α_t は抵抗の温度係数

ここで R_0 と α_t が温度サイクルに影響されずに決まる値であれば、測定された抵抗値からその時の温度を求めることができる。

固体の電気抵抗は、固体中の不純物、格子欠陥および格子振動による電子散乱によって決まり、一般的な金属では、抵抗の温度係数は正であり、温度の上昇とともに抵抗が増す。この仕組みを利用する測温抵抗体（resistance thermometers）による温度測定が広く行われている。

一方、半導体の場合は、抵抗—温度の関係は非直線的であり、温度係数は負になることが多い（温度の上昇とともに抵抗が小さくなる）。半導体のうち、安定性、温度係数などが温度の計測に向いているものを「サーミスタ」（thermally sensitive resistor、"thermistor"）と呼んでいる。

熱電対の特長は、ピンポイントの測定が可能、応答が速い、安価である、などであり、抵抗体温度計の特長は、経年劣化が少なく比較的管理が楽ということである。一般的な測温抵抗体の欠点としては、測温抵抗体は感温部に一定の容積があり、その分の熱容量があるため、温度変化に対する応答が（熱電対よりは）遅い、白金などを用いるため（熱電対より）高価になる、などである。しかし、深冷空気分離装置のような大型の装置では、測定の遅れが問題になるほどの高速の温度変化がないことから、長期間の安定性と管理の容易さから測温抵抗体による温度測定が行われる。

一般的な測温抵抗体の設置方法は、3線式（3導線式結線）あるいは4線式（4導線式結線）になっている。サーミスタの場合は、抵抗値と温度係数が大きく導線抵抗がほとんど無視できる場合が多いため2線式が用いられることが多いが、低温用白金測温抵抗体では3線式または4線式である。3線式であれば途中の導線抵抗による誤差の多くを取り除くことができ、4線式では、導線間の抵抗のばらつ

きによる誤差も取り除くことができるため、比較的長い配線が可能である。

深冷の装置では、運転制御の多くが圧力制御、流量調整で行われており、温度は結果として得られるパラメータであって、それほど厳密に温度制御をおこなっているのではない。驚くほど数多くの温度計が設置されている訳ではないため、安価な温度計を選択するというよりは、性能が安定しており、手間のかからない温度計であることの方が重要である。

比較的温度の測定数は少ないとは言っても、大型の商業装置では、やはりそれなりに温度の測定点数は多くなり、実験装置のように全ての温度計（感温部と測定装置）を精密に校正することは事実上不可能である。そこで、規格品を用いて一定の精度を保つことが行われており、JIS には、1997 年制定の PT100Ω、Pt10Ω の規格がある。

抵抗温度計には、温度上昇によって電気抵抗値が大きくなることを利用する金属や半導体の測温抵抗体の他に、温度によって抵抗値が大きく変化するサーミスタ（thermistor：thermally sensitive resistor）を用いた温度計がある。

サーミスタは金属酸化物などで作られ、温度が上昇すると抵抗が小さくなる NTC 型サーミスタ（negative temperature controller）、温度が上昇すると急激に抵抗が大きくなる PTC 型サーミスタ（positive temperature control thermistor）がある。

NTC 型は、温度と抵抗値の関係が比較的簡単であり、安価で検出感度が高く室温を中心とした温度範囲をカバーしているので、汎用的な温度検出センサーに用いられている。

PTC 型は、温度が上昇すると抵抗が大きくなるため、電流制限素子やヒーターにも用いられる。PTC ヒーターは、自己発熱によって電流が流れにくくなるため、異常過熱が起りにくいという特性があり、半田ごてや電気自動車の暖房装置などに用いられている。

③その他の温度計

非接触温度計として、可視光線あるいは赤外線を用いて対象物の温度を測定する放射温度計があり、主に高温の測定に用いられる。赤外線を用いて対象物の温度分布をグラフィカルに示すサーモグラフィーなどがある。

液柱温度計には、アルコール温度計、水銀温度計が古くから知られているが、ガラス管式であるため、ガスを取り扱う現場ではほとんど使用されることがない。

その他の温度計として、水晶温度計、超音波温度計（音速と温度）、色温度計、半導体温度計（ダイオードセンサー、トランジスタセンサー）、熱雑音温度計、示

温ラベル（融点での色変化）、形状変化温度計（窯業用）など、物性と温度の関係を利用した様々な温度計があるが、工業的に広く用いられるのは熱電対あるいは抵抗温度計である。

体温計（medical thermometer）は、動物の体温を測定する温度計である。

科学者が最初に温度の測定に興味を持ったのは、ヒトの体温であり、ヒトの健康管理のために、温度の計測が研究され、温度の目盛が考案されるようになった。

16世紀末にガリレオ・ガリレイが最初の気体膨脹式の温度計を考案、17世紀になってサントーリオ・サントーリオ（1561～1636年、ヴェネツィア）が初の実用的体温計を発明した。当初は、気体の膨脹、水の膨脹、アルコールの膨脹を利用した温度計が作られ、18世紀になってファーレンハイトがより正確な水銀液柱温度計を製作した。

150年ほど前に発明された現在の水銀体温計は、測定時のピーク値をホールドするために、水銀溜めと膨脹部の境を細くして、測定後に指示値が下がらないように工夫された液柱温度計である。大きな水銀の表面張力を利用して一旦膨脹して伸びた液柱の水銀が元の液溜に戻らないようになっている。一般的に外気温の方が体温より低い場合、指示値を読み取る時には、感温部の温度は下がるが、一旦上昇した測定値は保持される。再使用するためには、指示値をリセットしなければならず、体温計を振ったり、容器の中で回転させたりして水銀を水銀溜めに戻す必要がある。

近年は、赤外線式、サーミスタ式、半導体式など様々な体温計が開発されている。これらの「電子体温計」は、回路で最高温度を維持・表示し、再使用時のリセットも自動で行われる。電子式の体温計の普及によって、水銀体温計の仕組みやリセットのことを知らない世代も現れてきており、偶然使用した水銀体温計を連日そのまま使い続けて、いつまでたっても、体温が下がらないといったことも起こっている。体温計を振る、という動作は電話のダイヤルを回す、テレビのチャンネルを回す、エンジンの始動時にチョークを引く、などと同じように、若い世代には理解できない言葉になりつつある。

表 2-2-4 温度と温度目盛の歴史

年	法則・発見	理論・人物など
1592年	気体温度計	ガリレオ・ガリレイ
1612年	体温計	サントーリオ・サントーリオ
1702年	温度計	オーレ・レーマー、レーマ度
1713年	アルコール温度計	ガブリエル・ファーレンハイト
1714年	水銀温度計	ガブリエル・ファーレンハイト

1724年	ファーレンハイト度	ガブリエル・ファーレンハイト
1730年	レオミュール度	ルネ・レオミュール
1742年	セルシウス度	アンデルス・セルシウス
1765年	平賀源内	日本初の温度計（ファーレンハイトの寒暑計?）
1777年	カロリック説	アントワーヌ・ラヴォアジエ
1787年	シャルルの法則	ジャック・シャルル
1802年	絶対温度の概念	ゲイ=リュサック
1807年	エネルギーの概念	トマス・ヤング
1821年	ゼーベック効果の発見	トマス・ゼーベック、 熱電効果（異種金属間の温度差）
1824年	カルノーの定理	ニコラ・カルノー
1834年	ペルティエ効果	ジャン=シャルル・ペルティエ 熱電効果（異種金属間の温度差）
1844年	熱の仕事当量	ジェームズ・プレスコット・ジュール
1848年	熱力学温度の提唱（絶対温度）	ウィリアム・トムソン（ケルビン卿）
1851年	トムソン効果	ウィリアム・トムソン（ケルビン卿） 熱電効果（同一金属の温度差）
1854年	熱力学第二法則	ルドルフ・クラウジウス
1859年	ランキン度（絶対温度）	ウィリアム・ランキン
1861年	ジュール=トムソン効果	ウィリアム・トムソン（ケルビン卿） ジェームズ・プレスコット・ジュール
1861年	気体の分子運動論	ジェームズ・マクスウェル
1865年	エントロピーの概念	ルドルフ・クラウジウス
1877年	ボルツマンの関係式	ルートヴィヒ・ボルツマン
1880年	「寒暖計」	thermometer の日本語訳「寒暖計」が普及
1912年	熱力学第三法則	ヴァルター・ネルンスト
1927年	温度の標準化	国際温度目盛
1940年	「温度計」	日本語の「温度計」の定義、「寒暖計」の再定義
1954年	温度目盛（°K）制定	国際度量衡総会
1967年	単位ケルビン（K）制定。 セルシウス度の定義	国際度量衡総会
1968年	IPTS-68	国際実用温度目盛
1976年	EPT-76	国際温度暫定目盛
1990年	ITS-90	国際温度目盛

2. 2. 1. 3 ガスの圧力と産業ガス

(1) 圧力の単位

産業界では、これまでに何度か大きな単位の変更があり、使用する数値の桁が大きく変わったことがある。近年の産業ガス業界における最も大きなイベントは、工業規格の圧力の単位が、パスカル (Pa) に統一されたことである (1999 年)。それまでの古い単位、 kgf/cm^2 や torr などが、公式には使用できなくなり、古い圧力の単位に慣れていた業界では、新たなルールに対応することになった。

圧力や応力には、いくつもの単位が併用されていたので、パスカルへの統一は、非常によいことであった。それまでは、質量 kg と力 kgf の表記が曖昧にされることもあり、圧力を kgf/cm^2 ではなく kg/cm^2 と表示する圧力計などもみられたが、新しい圧力の単位パスカルでは、力 N (ニュートン) を用いて $\text{Pa}=\text{N/m}^2$ と定義されるため、質量と力が混同されることがなく、非常に分かり易くなった。

kgf は、質量ではなく力の単位であるから、測定した場所や検量した場所の重力加速度によって異なるというやっかいな問題を含んでいたが、力が N に統一されたため、どこで測っても圧力は同じである。

しかし、日本で広く使われていた kgf/cm^2 とパスカルは 5 桁も数値が異なっており、また、標準の重力加速度が、 9.8m/s^2 であるため、わずかに 10 からずれている分、換算後の数値には微妙な変更が必要となった。標準的な大気圧は、それまで、ほぼ 1 (1 アトム、1 キロ、1 バールなど) と呼んでいたものが、 $1\text{atm}=0.1013\text{MPa}$ (メガパスカル) あるいは $1\text{atm}=101.3\text{kPa}$ (キロパスカル) となり、工学気圧は、 $1\text{kgf/cm}^2 = 98.0665\text{kPa}$ と換算されることになった。移行時には、新旧の単位を使い分ける必要があるが、桁の違いだけでなく、微妙な数値の変更にも慣れる必要があった。

日本の気象学分野では、気圧の測定単位は、明治の初めの頃は mmHg が採用され、1945 年からは「国際気象通報式」である mb (mbar, ミリバール) に変更され、1992 年には、SI である hPa (ヘクトパスカル) に変更された。ここで、パスカルは SI であるが、このヘクト (10^2) という接頭語は 3 桁毎の接頭語を推奨する SI では非推奨であり、面積を表わすヘクタール ($1\text{ha}=1\text{hm}^2=10^4\text{m}^2$) 以外には、滅多に聞かない言葉である。SI は、3 桁毎以外の 4 つの接頭語としてセンチ、デシ、デカ、ヘクトを認めてはいるが、推奨はしていない。

しかし、 $1\text{mbar}=1\text{hPa}$ であるため、この変更では、数値 (数字) の変更が全くない。数字の変更を避けたのは、他の業界からみると、上手に切り抜けたようにも

みえるが、やはり3桁毎の接頭語ではないため違和感があり、hPaという単位は気象（気圧）以外では用いられていない。過去にmbarが使用されていたという経緯を知らなければ、ヘクトを使う意味が分からない。

産業ガスの業界は、高圧ガスの業界でもある。貯槽やシリンダーの圧力、ガスの取引などには工学気圧 (kgf/cm^2) が用いられ、空気分離などのプロセスにはメートル法 (bar)、物性には気圧 (atm)、真空機器には水銀柱 (Torr, torr, mmHg)、圧力差には水柱 (mmAq, mmH₂O, mmLiq) などが用いられてきた。

空気分離技術特有の単位 (ata) もある。ata というのは、工学気圧の絶対圧力 ($\text{kgf/cm}^2\text{abs}$) を意味しており、ドイツ由来の空気分離技術ではよく用いられ、フランス式では atu と呼ぶようである。いずれにしても通常の事典や「単位の辞典」にも載っていない単位である。産業ガスの周辺で用いられる圧力の単位は、非常に複雑・難解であったが、それなりに慣れていたので、これを全てパスカルに置き換えるのは、労力を伴う非常に大きな変更となった。

単位の統一は、古い単位に慣れた業界に切り替えを迫ったが、法令も影響を受けた。産業ガスを取り扱うための法令は、以前は「高圧ガス取締法」、1997年からは「高圧ガス保安法」と呼ばれる法律および関連の規則からなる。高圧ガスは歴史的な背景もあって、圧縮ガス、圧縮アセチレンガス、液化ガスなどに分類されているが、圧縮ガスの場合、高圧ガスとなるのは、圧力が 10kgf/cm^2 以上のものと定義されていた。これが、圧力の単位の変更によって「常用の温度で圧力が 1 MPa (メガパスカル) 以上になるもので、現に 1 MPa 以上のもの」と再定義されることになった。従来の高圧ガスの定義値、 10kgf/cm^2 は 0.98MPa となるが、数値のキリがよくないため、法律の定義の方が決め直された。

基準の変更や単位の統一は、かなりやっかいなことではあるが、数々のメリットがあるため、実施される。慣れるまでは換算をする必要があるが、圧力の換算はかなり面倒である。長さや質量の単位であれば、換算が比較的容易であるが、圧力の場合、力の単位と面積の単位が含まれ、次元でいえば、 $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ であるから、ぱっと暗算で換算することは難しい。基本的には慣れの問題であるが、懸念されるのは、移行時の読み間違いや勘違いによるミスや事故である。これを防ぐための工夫が必要で、教育、訓練、慣れには長い時間と手間がかかる。圧力や応力の単位がパスカルに切り替えられた移行時には、圧力（高圧と真空）や応力の読み間違いによる事故を防ぐために、表示には新旧の単位を併記するなどの工夫が行われた。

国際単位系 (SI) は、1954年に制定され、ほとんどの国で合法化されているが、

米国と一部の国では古い単位の使用が認められている。フランスとともに SI の制定を主導し、最も古くから SI 単位への切り替えを進めてきた英国も、過去のヤード・ポンド法の歴史が長いので、単位の読み違いによるミスを防ぐために生活に密着する様々なところで新旧の併記が行われている。

日本は、SI 制定から 37 年後の 1991 年に JIS（日本工業規格）が、国際単位系に準拠したが、それまでに使っていたメートル法が、SI 単位に近いので、ヤード・ポンド法の国ほど大きな変化はなかった。しかしその中では、圧力の単位の変更は比較的大きな変更のひとつであった。

ただし、日本は単位の扱いに少しいい加減なところがあって、ルールが守られないことが多い。kg や km、kB など、後ろを省略して何でも「キロ」と呼ぶ。ニュースでも、時間当たりの降水量を 50 ミリ、身長を 180 センチと読み、接頭語だけ読んで、肝心のメートルの方を読んでいないことが多い。正しくは 50 ミリメートル、180 センチメートルのはずである。

圧力もメガパスカルとフルには読まずに、35MPa を 35 メガ、70MPa を 70 メガなどと接頭語だけを読むことが多い。一方、キロというと kgf/cm^2 をさしていることが多く 150 キロといえば、150kPa ではなく、 $150\text{kgf/cm}^2\text{G}$ であることが多い。日本語の単位の読み方、書き方は、暗黙の理解が多く、圧力の単位も文脈で判断する必要がある。

多くの業界が圧力の単位を Pa に変更、気象はやや変則的ではあるがヘクトを用いて hPa となり、全ての圧力と応力が統一されたようにもみえるが、歴史的経緯、慣行から旧単位のままの分野もある。

血圧の計量には、水銀マンオメータ（mercury sphygmomanometer）が使用されることが多かった経緯から mmHg が長く使われてきた。これを変更すると混乱が生じる（大量の機器の更新、読み間違い事故の懸念、データの継続性など）と考えられ、世界的に使用が継続されている。

日本の計量法では、mmHg を恒久的に使用することとしており、逆に Pa への変更はできなくなっている。生体内の他の圧力も mmHg が使われていたが、こちらは Torr へ変更された（2013 年）。定義が異なるため、 $1\text{mmHg} = 1.000000142466321\dots\text{Torr}$ となるがほとんど違いがなく、日本の法令では mmHg と torr は厳密に等しいと定義されている。

(2) ゲージ圧力

気体の圧力を測定する工業用の圧力計は、絶対的な圧力ではなく、周囲の圧力、すなわちその場での大気圧との差を測定する「ゲージ圧力」を表示するものが多い。

これは、簡易な圧力計では、絶対真空をゼロとして測定することが難しいためであり、測定対象と大気圧との差を金属管の変形から読みとるブルドン管式圧力計が多いためである。ゲージ (gauge) という英語には、シックスゲージなどの計測器、寸法の規格 (厚さ、口径、ワイヤー、鉄道のサイズ、針)、その他の規格、場の理論であるゲージ理論、など実に様々な意味があるが、圧力に関する言葉としては、プレッシャー・ゲージ (pressure gauges、圧力計) とバキューム・ゲージ (vacuum gauges、真空計) がある。

産業ガス (高圧ガス) の場合は、ゲージといえば、圧力計を指すことが多く、大気圧との差圧を「ゲージ圧力 (gauge pressure)」と呼ぶ。工業的に使用される圧力計の多くが、ゲージ圧力計であり、科学的な圧力、絶対圧力 (absolute pressure) とは定義、測定基準が異なっている。

ゲージ圧力計では、その場の大気圧との差圧を測定しているため、ゲージ圧力はガスの圧力ではなく、ガスの差圧であり、実際のガスの圧力はその時の大気圧を加えた値である。標準大気圧が、およそ 0.1MPa であるから高圧ガスの容器に付属するゲージ圧力計の値が 15MPa の時、内部のガスの実際の圧力は約 15.1MPa ということになる。高圧ガス容器の場合、充填されるガスの圧力は大気圧よりもかなり高い圧力であるため、通常はあまり考慮されていないが、通常の容器でも、ゲージ圧力と絶対圧力は1%くらい異なっている。また、内部のガスの圧力が同じでも、測定する場所の大気圧が異なれば、当然ゲージ圧力の指示値は異なる。

連成計と呼ばれる正圧と負圧の両方を表示する圧力計では、ゼロのところが大気圧で、そこからマイナス 0.1MPa 付近までが、赤い目盛になっているものが多い。圧力には、マイナスという概念がないので、当然のことながら、これはゲージ圧 (大気圧との差圧) がマイナスということである。

大気圧をゼロ点として、高い圧力を「正圧」、「陽圧」、低い圧力を「負圧」、「陰圧」と呼ぶこともある。陽圧であることが重要な場合があり、毒性ガスを取り扱う場所などに備えられている緊急用の空気呼吸器では、顔を覆う面体 (マスク) に毒性ガスが進入しないように供給される空気が外に漏れるように圧力が高く設定される「陽圧式呼吸器 (圧力デマンド式)」が用いられている。建屋の中に外気が入ると困るような時や場所、たとえば、原子力発電所の操作室のようなところでは緊急時には陽圧に制御される。外部からのごみやほこりの侵入を防ぎたいクリー

ンルーム（半導体製造など）では、常時陽圧で制御される。深冷空気分離装置のコールドボックス（低温保冷箱）も、外気（空気や水分）の侵入を防ぐために、わずかに窒素ガスで陽圧に制御されている。逆に、陰圧の方がよいこともあり、たとえばウィルスや病原菌を取り扱う設備や、原子炉格納容器などでは、内部の空気が外に漏れるのを防ぐために、陰圧（負圧）制御される。陽圧制御や陰圧制御だけで完全に流れを制御できる訳ではなく機密性の高い構造などが前提として必要であるが、かなり有効な方法である。

ゲージ圧力計と絶対圧力計の取り扱いで、やっかいなのは、そのことが明示されないことが多いことである。絶対圧、a (absolute) あるいはゲージ圧、G または g (gauge) の記号を用いるのが一般的である、工業用圧力計ではゲージ圧力で表示するのが暗黙の了解であったため、いずれも表示されないことが非常に多い。

たとえば、 $\text{kgf/cm}^2\text{G}$ と書かれていれば、はっきりするが、G が省かれることが多く、中には f も省略されることがある。「 kg/cm^2 」と書かれたものを文字通り受け取ると、面積あたりの質量となり物理的な意味が分からないが、昔は、力を質量で表すという単位系があったので、これを力（圧力）と読み替え、（明示されていないが）ゲージ圧とするのである。「 kg/cm^2 」は、単位面積当たりの力（kg 重、または kgf）であり、大気圧との差「ゲージ圧力」であるという「暗黙の了解」がある。米国製の機器に、今でもよく表示される圧力の単位に、psig と psia がある。これは、psi (pounds per square inch、 lbf/in^2) に a あるいは g を付加したものであり、ぶさいく、ぶあいあ、と読む。こちらは単位の事典に掲載されており、絶対圧とゲージ圧を比較的明確に区別している。

パスカルという単位は、SI 単位の圧力であり、工学的な使われ方には言及しないため、ゲージ圧力という考え方が配慮されていない。したがって、特に決まりはないが、ゲージ圧力を使う時には、Pa の後に G(gauge) と書き、PaG とするのが間違いのないと思われる。

しかしパスカルをゲージ圧力に使用する時にも、何も書かれないことも多く、自動車のドアなどに表示されているタイヤの「指定空気圧」には、kPa と表示されており、kPaG とは書かれていない。常識的に考えると、絶対圧ではないことは分かるが、明示されない例は多い。深冷空気分離装置などの工業装置に用いられる圧力計のほとんどがゲージ圧力計である。kPaG や MPaG と書く間違いがないが、何も書かれていないことも多い。明確なルールとルールに従うという考えが欲しいと思うが、どの業界にもある「暗黙の了解」というのは、やっかいなものである。

ゲージ圧力計では「ゼロ」は真空ではなくその時の大気圧と等しいことを意味している。

高圧ガス容器（シリンダー）に取り付けられている圧力計もほとんどがゲージ圧力計であり、指針がゼロとなっても、それは容器の中が空になっているという意味ではなく、現在の大気圧と同じ圧力まで低下しているので、圧力差ではガスを取り出すことができないということを示している。容器に残ったガスの圧力を「残圧 ざんあつ」と呼んでいるが、残圧がゼロ近くになった容器を「空瓶、くうびん」と呼ぶ。

一般的には残圧がゼロになると、温度によっては負圧になってしまい、容器内を空気で汚染する可能性があるため、完全に残圧がゼロになる前に使用を止めるのが正しい使い方である。したがって、産業ガスの販売店へ返却される「空瓶」の中は完全に空という訳ではない。一般的に、産業ガスの販売は、中身のガスだけであり、容器は「通いの瓶」として一時的に貸与されるというものが多い。これは、法令に基づく高圧ガス容器の安全管理が消費者には難しいため、販売店などが容器の所有者となることが多いためである。

なお、出荷時に既定の圧力になっている容器を「充瓶、じゅうびん」と呼ぶ。

(3) 圧力の範囲

表 2-2-5 に様々な圧力の比較をパスカルで示す。

表の一番上は、最も低い圧力である宇宙空間の圧力である。

よく「宇宙空間並みの真空」という表現をみかけることがある。しかし、実際の宇宙空間には、原子・分子がほとんど存在しないため、圧力の定義ができない。宇宙空間で圧力を考えることができるのは、地球や月のような天体の近くや、わずかに星間物質が存在するところである。しかし、このような物質が多い場所であっても、分子、原子やエネルギーの量は非常にわずかであり、圧力は極めて低く、nPa オーダーとなる。

これに対して、地上で人工的に作りだせる通常の超高真空はおおよそ $10 \mu\text{Pa}$ 程度であり、宇宙空間のような高真空とは比較にならないほど圧力が高い。世界記録を達成するような特殊な超高真空装置であれば、宇宙空間に近い真空に近づくことも可能であるが、一般的な工業製品や真空装置ではそこまでの

真空はコスト的に不可能である。空気や物質（真空容器）に囲まれた地上で超高

表 2-2-5-圧力の比較（概略値）

圧力	圧力の種類
	宇宙空間、分子 10^6 個/ m^3 以下
0.01 nPa	人工の到達最高真空、最低圧力
0.1 nPa	極超高真空、分子 $10^{10} \sim 10^6$ 個/ m^3
0.1 μPa	月の大気圧（昼間）、分子 10^{11} 個/ m^3
10 μPa	超高真空機器 10 $\mu\text{Pa} \sim 1\text{nPa}$
10 μPa	高真空（JIS）
20 μPa	可聴音の基準圧力
0.1 mPa	国際宇宙ステーション周りの大気圧、 0.1mPa \sim 0.1nPa ($10^{-4} \sim 10^{-10}$ Pa)
	高真空断熱
0.1 Pa	中真空（JIS）、真空断熱
100 Pa	低真空（JIS）
750 Pa	火星の大気圧
81.5 kPa	標高 2000m の気圧
89.9 kPa	標高 1000m の気圧
98.1 kPa	工学気圧 (1kgf/cm ²)
100.0 kPa	標準圧力 (1bar)
101.3 kPa	標準大気圧 (1atm)
250 kPa	乗用車のタイヤの空気圧（ゲージ）
500 kPa	深冷空気分離装置（高圧塔）
1 MPa	法に定める高圧ガスの定義
	応力の単位 =1N/mm ²
1 MPa	大型トラックのタイヤの空気圧
1.4 MPa	旅客機のタイヤの空気圧
2 MPa	蒸気機関の圧力、水深 200m
7.4 MPa	CO ₂ の臨界圧
9.3 MPa	金星の地表の大気圧
15 MPa	標準的な高圧ガス容器の充填圧力
20 MPa	アンモニア合成反応
22.1 MPa	水の臨界圧
70 MPa	油圧ポンプの吐出圧
70 MPa	FCV の車載水素容器の充填圧力
100 MPa	地球の海洋の最深部の水圧 (10km)
5 GPa	ダイヤモンド合成 (地下 150km)
125 GPa	地球の外核 (地下 2900km)
360 GPa	地球の中心部 (364 万気圧、5500°C)
35 PPa	太陽の中心部

真空を得ることは容易ではないので「宇宙空間並みの真空」という表現は、不用意に使うことはできない。一方、法に定められる高圧ガスの定義は1MPa以上であるが、海洋底や地球内部など自然界にある圧力は桁外れに大きい。海底や地底というのは、それでも地球の深部ではなく、ごく表面であるが、工学的に作り出される圧力と比べると非常に高圧である。地上で真空を作り出すのが簡単ではないように、地上で高圧の環境を作り出すのも簡単ではない。

マントルが融解してできるマグマが地表に運ばれることがあるので、ある程度の深さのサンプルを得ることはできる。しかし、それは、およそ深度200kmまでのことであるから、それよりも、もっと深い地下でどのようなことが起きているのかを研究するためには、高温・高圧の環境を再現する必要がある。地下でどのような化学反応が起こるのか、天然ガスや石油のような地下資源はどのようにして生成されているのか、ダイヤモンドのような鉱物はどのようにして作られるか、といった研究には、実験室で高圧を作り出し測定する技術が必要である。

たとえば、地球の中心（深さは約6400km）は、重力加速度はゼロであるが、創世記に中心に沈んだ鉄のコアの圧力は360万気圧（36GPa）と推定されている。このような高温・高圧を実験室に再現、鉄の結晶構造が解析できるようになったのは21世紀になってからである（2010年、東京工業大学、廣瀬敬ら）。これには、高温、超高圧を達成・測定する技術の進歩もあるが、このような高温・高圧下の環境におかれた直径数十 μm の試料をそのまま解析できるSPring-8のような大型放射光施設が実現されたことも大きいとされている。

宇宙の真空から星の内部の高圧まで、自然界における圧力の範囲は非常に広い。しかし、われわれの時代の科学は、まだその一部にしか到達していない。