

2. 2. 1. 4 階層の観測

(1) 波の観測

階層を意識することは、われわれが自らの位置をより客観的に理解するために必要なことである。また、階層の理解が重要と思うのには、次のような理由もある。

①階層が異なると常識が大きく変わる②階層が異なると技術領域が変わり、観測や取り扱いの手法も異なる③産業ガスのビジネスは、分子と原子を取り扱うことが多く、さらに同位体や原子核の議論もあるため、一般の化学産業とは少し階層が異なる④ガスの物性やガスの液化を理解するには、特に小さな階層の知見が必要となる⑤産業ガスのユーザーが対象とする階層は非常に広い。

産業ガスのユーザーは、鉄鋼、化学から物性物理（半導体や超電導）、生物医療分野などに広がり、対象とする階層が非常に広い。さらに研究用のガスや特殊な機器のユーザーには、アカデミーや研究機関も多く、極めて小さな階層を対象とする実験物理学からとてつもなく大きな階層である宇宙分野（観測、開発、理論）まで、われわれのユーザーが対象とする領域は、ほぼ全ての階層に広がっている。提供する素材のほとんどは「分子」であるが、対象となる技術の範囲は非常に広い。

また、上の階層は、下の階層に支配される。ヒトは、自らの細胞や他の微生物の機構に支配され、それは、生体反応、化学反応に支配され、さらに分子、原子と、ずっと下の階層の持つ性質や法則に支配されている。上の階層は、下の階層の支配・法則からは逃れることができない。何かを調べようとすると、どんどん小さなものを観測することになるのは、基本的な法則は、より小さな階層から始まっているからであり、次々に下の階層を調べていくと、やがて、電子やその他の素粒子にまでたどり着く。しかし、われわれは、ほとんどのものを直接、観測することができない。空気もそこに含まれている酸素も人の目には見えず、透き通っている水もその中に何が含まれているのかを見ることはできない。階層が異なるということは、基本的には、見えないということである。

ヒトが感覚によって得る自然界の情報は、ごくごく一部であり、ありのままに見えている自然は、自然の本質とは全く異なっている。科学の目があれば、見えない不思議や見えない恐怖の本質を理解することができ、それを利用することができるようになる。

「百聞は一見にしかず、百見は一考にしかず、百考は一行にしかず、百行は一果にしかず…」という故事が知られる。

解釈は様々ありそうである。「百聞は一見にしかず」は「人に聞くより見た方が早い」ととれるが「いくら人から聞いても、自分で見なければ本当のことはわからない」とも、あるいは「聞くよりも見る方が100倍も理解できる」ともとれそうである。

聞くことと見ることには大きな差がありそうである。ここでは階層を聞く技術、見る技術について整理をしたいと思う。

実際に自分の目で見たもの以外は信用しないという人がいる。しかし、ほとんどの人が、空気中に21%の酸素があることや、地球の上にくつもの大陸や国があるといったことを、自分で確かめたことがない。空気中の酸素は見え、数えることもできず、たいていの人は分析する術がない。ほとんどの知識は、自分で体験して得たものではなく、誰かに聞いたり、学校で習ったり、本で読んだりして得たものであり、先人から学ぶものばかりである。

空気やガスの研究では、見えない空気の分子を理解するために、温度や圧力やエネルギーが発明された。しかし、これらは概念的なものであり、科学の研究の基本は自然の観察であるから、やはりヒトの最も重要な感覚である、聴覚（音）と視覚（光）が科学の探求の出発点にある。ここでは、音と光は、いずれも「波」であり、古くから重要な科学の研究対象となってきた。多くの科学者が波の研究者である。先人たちが残してくれたガスの科学や産業技術を継承するためには、彼らが発明してきた波の観測方法や理論を知る必要がある。

この故事の本当の意味は、「いくら聞いても見なければわからない」、「いくら見ても、考えなければ前に進まない」、「どんなに考えても行動しなければ進まない」、「どんなに行動しても、成果を残さなければ成長しない」という行動指針ということらしい。人は受動的であるよりも能動的であるべきとの教えのようである。

個人の経験や体験は重要であり、行動も結果を残すことも重要である。しかし、産業ガスや現代物理学の歴史は120年もあるので、先人たちから学ぶことは非常に多い。まず、100回くらい聞いてみることも重要である。

(2) 音の情報

「百聞は一見にしかず」は、現場に行ってみることの重要性を説いているが、聞くよりも、見る方がよく分かるといっているようにも聞こえる。

確かに、光の情報からは、形状や色彩などの様々な空間的情報が得られる。話で聞くよりも映像で見る方が、たくさんの情報が得られたような気になり、現物を目の前にすると、より印象的である。しかし、ヒトの感情や感動と実際の自然界の情報とは同じものではない。どちらかと言えば、かなりかけ離れているのかも知れない。聴覚（音）情報よりも視覚（光）情報の方が情報量が多いと考えられているが、情報は量だけではない。音と光は、それぞれが異なった性質の情報を伝えているので、簡単な比較はできそうにない。

たとえば、ヒトの場合、捉えられる映像は前方に限られるが、これに対して、音は基本的に全方向から伝わってくる。ヒトが感じることができる光の波長領域は狭いが、音の場合は波長領域が非常に広く、また、時間軸に対して波長とエネルギーと方角の情報を伝える。

可視光線は、貫通力が小さく、壁で遮られるため、壁の向こう側を見ることはできないのに対して、音が壁を貫通する能力は高く、条件によっては壁の向こうの音が聞こえる。したがって、見たくないものを見ないようにすることは、比較的容易であるが、音は全方向から壁を越えて伝わり、聞きたくない音を聞かないようにすることは、簡単ではない。

音は、主に空気や水の中を伝わる波であり、ヒトの聴覚は、主に空気の振動を感じてとらえる。ボイルが真空ポンプや空気ポンプを用いて空気の研究をはじめた頃、音は真空中を伝播しないことが分かっていた。

音の伝播には、気体、液体、固体のような媒質（弾性体）を必要である。音が空気中を伝播するとき、空気の密度は、音の進行方向と同じ方向に変化し、振動が疎密波（compressional wave または pressure wave）として伝播する。疎密波は、縦波（longitudinal wave）である。

基本的に音は縦波であるが、固体中を伝わる時には、振動が進行方向に垂直の横波（transverse wave）の成分が含まれることもある。地震によって発生する波には、縦波（粗密波、圧力波、pressure wave）と横波（ねじれやせん断によって生じるせん断波、shear wave）がある。縦波の方が、到達時間が早いので第一波（primary wave）、横波の方が後から到達するので、第二波（secondary wave）という呼び方もあり、頭文字は同じでP波、S波である。

媒体を伝わる波（振動）を動物の聴覚器官がとらえ、それが音として認識される

ことが古くから知られている。

空気中を伝わる音波 (acoustic wave) を取り扱う、音学 (musicology) あるいは音楽 (music) は、古代より数学の一部として理解されて、多くの音律が研究されてきた。近代になって錬金術が科学に置き換わってからは、媒体中を伝わる音は物理学の重要な研究対象となった。

トマス・ヤング (1773~1829年、イングランド) は、エネルギーの概念を提唱した物理学者であるが、本業は開業医であり、音楽家である。ヤングは、医学と音楽と物理学の3つの立場から波を研究した。音の研究からヤング音律を発明し、光の研究からは、乱視、光の三原色、光の干渉を発見した。

音の研究で重要なのは、弾性体の研究であり、弾性体の基本となるのはフックの法則 (1676年) である。フックの法則における、同軸方向のひずみと応力を関係付ける比例定数 (縦弾性係数) はトマス・ヤングに因んで、「ヤング率」と呼ばれる。同時代のシメオン・ドニ・ポアソン (1781~1840年、フランス) が提唱した、応力に直角方向に発生するひずみと応力方向に沿って発生するひずみの比は「ポアソン比」と呼ばれる。



図 2-2-5-トマス・ヤング (1773~1829年) (Wikipedia)



図 2-2-6-ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (1821~1894年) (Wikipedia)

フックの法則を基本とする弾性体の研究は、フックがこの法則を見出してから、1世紀半もの時を経てヤングやポアソンによって始められた。

ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (1821~1894年、プロイセン) もヤングと同じく医者であり物理学者であり波の研究者であり、光の残像、耳の知覚、三原色と色覚異常の研究が知られる。物理学者としてのヘルムホルツは、熱力学における (ヘルムホルツの) 自由エネルギーの提唱、エネルギー保存則の発見 (熱力学の第一法則として、ヘルムホルツの他にロベルト・マイヤーとジェームズ・プレスコット・ジュールがそれぞれ独立して発見)、電気二重層のヘルムホルツモデルなど重要な結果を残している。

音の研究では、音色 (音の波形)、倍音、共鳴、強度など音や音楽に関する重要な理論が有名である。ギターやバイオリンなどの開口部を持つ楽器は、「ヘルムホルツ共鳴器」と呼ばれ、周波数分析装置やスピーカーはヘルムホルツの共鳴理論を利用している。

表 2-2-7 に音と波の主な研究者を示す。物理学者の多くが音波の研究を行ってお

り、物理学、熱力学、音学は密接につながっている。

ヒトの聴覚は全ての音を感じる事ができない。他の動物が感覚器で感じる事ができる音であってもヒトが聞く事ができない音が存在するということが、古くから知られている。ヒトの「可聴音」の範囲は、周波数で表わされ、およそ20Hz～20kHzであるが、周波数の高い方は、個人差や年齢差があり、全ての人が可聴音を認識できるものではないため、研究の方法は難しいが、19世紀末には、電磁気学と熱力学で有名なルートヴィッヒ・ボルツマンや古典力学の大家レイリー卿がヒトの最小可聴値（閾値）の測定を試みている。

一般的にヒトの聴覚の可聴範囲は非常に大きい。図2-2-7-にヒトの可聴域を音階（西洋の五線譜）で示す（図は、一般の可聴音より少し広い11オクターブ、C-1～C11、8Hz～32kHzを示している）。

音符にしてみると、可聴範囲が非常に広いことが分かる。

ここでヘルツ（Hz）とは、波の振動数を表わすSIの組立単位であり、一定周期で起こる事象を表現する時に用いられ、波の場合は、1秒間に1回の周波数・振動数（1/s）を表わす。

ここで、周波数 f は、波の周期を T とすると、

$$f = 1/T$$

音の伝わる速さを v 、波長を λ とすると、

$$f = v/\lambda$$

と表わされる。

英語では frequency とひとつの単語で表されている言葉が、日本語では「周波数」（波の数）、「振動数」（往復動の回数）と2つの言葉にして使い分けられている。両者は、全く同じものであるが、工学分野（電気、電磁波、音響）では周波数、力学の場合は振動数が用いられることが多い。表2-2-6に波の表現方法の例を少し整理する。光の場合は、真空中の速度が一定であるため、光速度を振動数で割った「波長」で表現することも可能である。特に可視光線は、振動数ではなく、波長で示されることが多い。frequency を「周波数」と「振動数」に使い分けしている例の逆も多く、たとえば、英語の oscillation と vibration は、いずれも日本語では「振動」と訳されているため区別しにくいことがある。

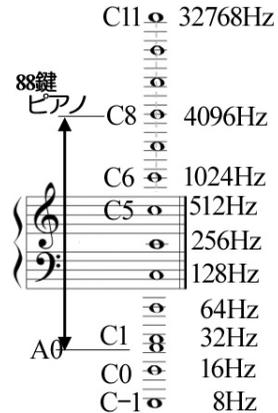


図2-2-7-ヒトの可聴音
（一般的には20Hz～20kHz）

日本語で、ひとくくりに「渦」「渦巻き」と呼んでいるものの中には様々に異なる現象が含まれており、英語では、vortex、eddy、swirl、spiral、などいくつもの単語がある。気体や液体などの流体を

表 2-2-6-波を表現する方法の例

波の種類	記号	英語	日本語	備考
音	f	frequency	周波数	可聴音は 20Hz ~ 20kHz
光	ν		振動数	
電波	f		周波数	3Hz~300GHz
音・光、その他の波	λ	wavelength	波長	可視光線の波長は 360~830nm
	A	amplitude	振幅	
	$\tilde{\nu}, k$	wavenumber	波数	SI では m^{-1}

取り扱う時は、「渦」が、実際は何を意味しているのかに注意する必要がある。

表 2-2-7 日本語が少なく、分かりにくい技術用語の例

日本語	英語	意味	用例
振動	oscillation	長周期の振動	周期振動、スロッシング
	vibration	短周期の振動	機械振動
	motion	振動、動き	地震動：ground motion
渦	vortex	渦巻き、旋風	渦度 vorticity、台風の渦、カルマン渦：Kármán vortex street
	eddy	風の渦巻き	乱気流、スワール
	swirl	ふらふらの渦	シリンダー中心軸まわりの横渦、スワール比
	spiral	螺旋形、渦巻き	渦巻銀河 spiral galaxy
	whirlpool	水の渦巻き	渦流浴、鳴門の渦潮
	whirlwind	旋風、渦	
	tornado	旋風、竜巻	水上竜巻 waterspout 陸上竜巻 landspout
	回転、渦	spinning	回転、渦
rotation		回転、渦	ローテーション
circulation		循環、渦	蒸留塔トレイ上の旋回流
swinging		回転	
周波数	frequency	振動数と同じ	音の周波数
振動数		周波数と同じ	光の振動数

空気の振動は、すぐに減衰して消えてなくなる。音は、到達距離が短く、音源（発生源）のすぐ近くで、短時間しか感じ取ることができない情報である。そのため、音を記録する方法として、音楽の楽譜（music）が発明され、音符（note）に記さ

れるようになった。しかし、音 (note, sound) そのものは残らないため、もう一度聴くためには、記録に従って再演しなければならない。同じ楽譜、同じ演奏者、同じ楽器であっても、全く同じものを再現することはできないので、これは再現方法・手順の記録であって、音の記録ではない。

そこで、波の波形 (波の成分を合成したもの)、周波数、強度などの音の情報を記録し、その情報を元に音を再現する技術が開発された。再現される時空 (場所と時間) は同じではなく、音を遠隔地に伝える場合には、ラジオ、電話、無線などを通して伝えられた情報に基づいてスピーカーから音の振動が再現される。音を未来に伝えるには、録音記録 (情報) を用いて再生機で再生、スピーカーから音が再現される。いずれも 19 世紀中盤以降に開発された技術であり、最初に音源を記録したフォノグラフは 1857 年、電話機は 1876 年に発明された。

近年は、音の記録のためにデータのデジタル化が行われるようになり、空気の振動データを、ある頻度でサンプリングしてその波形をデジタル化し、数値データとして取り扱うという方法が一般的となっている。サンプリングの頻度は、サンプリング周波数あるいはサンプリングレートと呼ばれ、単位は音の周波数と同じ Hz である。

サンプリング周波数は、音の周波数の 2 倍よりも高くないと周波数帯域 (バンド幅) が外れてしまい、雑音の原因となる。したがって、サンプリング周波数が高い方が、記録の品質が高く、再現の精度がよい。しかし、サンプリング周波数が高いと、取り扱うデータ量が多くなるため、サンプリング周波数は、実用的に問題がないところまで低く設定されている。

たとえば、音楽用 CD (コンパクトディスク) では、ヒトの可聴域を考慮してサンプリング周波数を 44.1kHz に設定している。これは CD 技術が実用化、市販された 1982 年当時の生産技術、ディスクのデータ容量、音楽の演奏時間、ヒトの可聴域 (20kHz) を考慮して、この周波数以下で前処理 (フィルターでカット) して、デジタル化しても音声や音楽の記録・再生には実用上の問題がないとされたためである。現在は、デジタルデータの圧縮技術が進み、機器の性能も向上したため、取り扱うデータ量 (保存、転送する量) が大幅に少なくなっている。

図 2-2-8 にヒトと動物の可聴域を示す。哺乳類の聴覚の範囲は、鳥類や魚類、昆虫など他の動物に比べるとかなり広く、周波数で 3 桁～4 桁もある。ヒトの可聴音域も広いが、同じ哺乳類である犬やコウモリやイルカではさらに、高音 (高周波数) に可聴域がある。

ヒトの感覚として、周波数の 2^n 倍の音は、同じ種類の音として認識されることが分かっている。この 2^n 倍の音が同じ音 (同種の音) に聞こえるという現象は、個

人差がないヒト共通の感覚であり、古代より、これを分割した「音律 (tone temperament)」が研究されている。

音律は数学や物理学の波の問題であり、ピタゴラス音律やヤング音律 (トマス・ヤング) など非常に多くの音律が発明されている。代表的な西洋音楽では、 2^n 倍の音を 8 つの音階とし、8 (オクト) を語源とする「オクターブ (8 度音程)」と呼んでいる。音感 (音高を認識する方法、能力) には個人差があるが、オクターブの音が同じ音に聞こえるこ

動物の可聴域

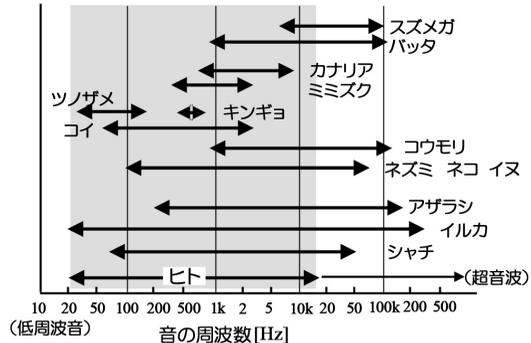


図 2-2-8-ヒトと動物の可聴域

参考：板橋秀一「音声から情報を得る」他

とには個人差がないので、この間を分割することによって音律が作られている。なお、この場合、周波数 2 : 1 の最初と最後の音を重複して数えているので、8 という数字が現われているが、実際の音程の数は 7 度であり、アイザック・ニュートンが虹の色 (光のスペクトル) を 7 色としたのも、この音階の「オクターブ=7 分割」に由来している。オクターブの 7 音階は、途中 2 ヶ所が半音階 (音階のミ・ファとシ・ドの間) となっているため、半音を 1、全音を 2 と数えると、オクターブは、 2^n 倍毎の倍音を 8 分割ではなく 12 分割したことになる (全音 5 ヶ所+半音 2 ヶ所)。

音階の全てを等間隔として、音の周波数の分割を等分割にした音律を平均律 (equal temperament) と呼び、最もよく知られているのが、オクターブを等間隔に 12 分割した、十二平均律オクターブである。音の周波数は、連続しており、異なる分割数や等間隔以外の分割方法が可能であるが、1 オクターブ (倍音) を等間隔に 12 で割った十二平均律が最も広く普及している (図 2-2-6 の五線譜)。このオクターブが同じ音に聞こえるのというのはヒトの共通の感覚であり、音の基準音との違いを聞き分ける「相対音感」もほとんどの人が持つ能力であるが、音の周波数を正確に聞き分けることのできる「絶対音感」は個人差が大きく、精度は人によって大きく異なる。

なお、他の分野でも、8 回毎に繰り返される現象を、オクターブと呼ぶことがあり、メンデレーエフの周期表よりも前の初期の元素周期表では、元素を並べると 8 個毎に同じ性質の元素が現れると考えられたため、これをオクターブの法則 (オ

クテット則)と呼ばれたこともある。しかし、実際にオクテット則が通じるのは、第二周期元素と第三周期元素だけであり、現在知られている周期表の一周期は18族までである。(昔0族と呼ばれた希ガスは、現在は第18族元素)

表 2-2-8-音、波の研究者

	音	光	医学	その他
ヴィンチェンツォ・ガリレイ (1520～1591年)	音響研究に数学手法を導入、和音			作曲家、音楽理論家 実験結果の定量的記述
ロバート・ボイル (1627～1691年)	音を伝える空気の実在を実証			ボイルの法則
アイザック・ニュートン (1643～1727)	音速の研究	虹の研究 粒子説		ニュートン力学
ダニエル・ベルヌーイ (1700～1782年)	波動方程式			ベルヌーイの定理
ウィリアム・ハーシェル (1738～1822年)		赤外線の見		音楽家、天文学者
ピエール＝シモン・ラプラス (1749～1827年)	音速理論の確立			数学
ジョン・ドルトン (1766～1844年)			色覚	ドルトンの原子説 太陽のドルトン極小期
ジョゼフ・フーリエ (1768～1830年)	フーリエ解析			熱伝導のフーリエの法則
トマス・ヤング (1773～1829年)	ヤング音律	三原色 光の干渉 波動説	乱視	エネルギーの発明 弾性体の研究、ヤング率 音楽家、医師
ゲオルク・ジーモン・オーム (1789～1854年)	音色の認識			オームの法則
クリスチャン・ドップラー (1803～1853年)	音のドップラー効果			(光は横波であるが、音と同じくドップラー効果がある)
ヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (1821～1894年)	共鳴理論 倍音	三原色	色覚 光の残像 耳の知覚	自由エネルギー 電気二重層、渦、エネルギー保存則 音楽家、医師
ジョン・ウィリアム・ストラット (1842～1919年)	レイリー波 可聴域	レイリー散乱		アルゴンの発見

音という波は、数学、物理学、音楽（音による芸術）、音楽学（音楽実践、音響学、心理学、人類学）などの芸術・学問分野において、長く多くの研究がなされてきたが、計測など工学の分野でも広く利用されている。ヒトの可聴域は、かなり広いが、可聴域を越えて周波数が高い音を「超音波」、下限以下の周波数の音を「低周波音」と呼ぶ。ただし、超音波と低周波音という分類は、ヒトの可聴域をはずれているという便宜的な区分けであって、物理的な波としての違いは全くない。音波を使った機器に、超音波〇〇（探知機、流速計、検査機、洗浄機、モーター、距離計など）といった名称が使われることがあるが、これは、利用する音が生ずる可聴音よりも周波数が高い領域の音であることを表明しているだけであって、超音波が可聴音とは別の音波ということではない。

ただし、周波数が高い音は、指向性が高く音圧を変えやすいという性質があるため、超音波を利用する測定器や加工機械、治療機械などが広く利用されている。

超音波検査（エコー検査、ultrasonography）が人体内部の検査に利用されており、放射線検査に比べて侵襲性（invasion）が低いとされている。

工業用途としては、主に検査、測定、通信に用いられており、素材の厚さを測る超音波厚さ計、超音波（伝播時間差式）流量計、超音波（ドップラー式）流量計（音波ではなく光を使ったレーザドップラー流速計もある）、超音波探傷検査（UT）、超音波映像装置（SAT）、魚群探知機、超音波映像・検査装置（電子部品の欠陥検査）、超音波積雪計、自動車の周辺障害物検出器（クリアランスソナー）、などがある。水中では、電波通信が使えないため、超音波を利用した水中電話・水中無線機、ソナーなどが使用されている。

超音波を駆動に利用するものとして、超音波モーター（カメラ用レンズ駆動、腕時計）、超音波歯ブラシ、超音波溶着・溶断（超音波ミシン）、超音波洗浄機、超音波加湿器、超音波霧化機、高密度焦点式超音波治療法（High Intensity Focused Ultrasound、ハイフ：癌、結石、血栓の除去に利用）、などがある。

動物の中には、自ら音を発して、その反響を受信して、周囲の情報を得る（反響定位と呼ぶ）、あるいは通信を行うものがある。一部のコウモリやクジラは、指向性の高い高周波の音（人間にとっては超音波）を利用している。

一方、周波数が100Hzよりも低い音は「低周波音」と呼ばれる。超低周波音には、超音波のような有用な利用法はほとんど考えられておらず、ヒトの聴覚では聞き取れない20Hz以下の超低周波音による健康被害や公害問題が研究されている。

低周波音の発生源は非常に多く、人工のものとしては、工場、高速鉄道のトンネル出口、変圧器、冷凍機、ヘリコプター、エコキュート（10Hz、深夜に稼働）、大型風力発電施設、エアコンの室外機、下水管の共鳴、自動車のエンジンのアイド

リング、などが知られている。

一般に公害といえば、大きな設備や工場がその原因であることが多いが、低周波音の場合は、普通の民家であっても公害の発生源となることがあるため、政府や自治体などが注意を呼びかけている。環境省が配布する「よくわかる低周波音」には、発生源、判定方法、防止方法などについての解説がある。低周波音の被害・加害防止は、基本的には発生源側の対策が必要である。

自然界にも、川の流れ、滝、雷など、多くの低周波音発生源がある。火山噴火に伴う空振（くうしん、air vibration）は、通常はヒトの耳には聞こえない可聴音以下の低周波（衝撃波）として伝わる。可聴音の成分が含まれる場合には爆発音として聞こえるが、そうでない場合は、聞こえない音が大きな被害をもたらすことがある。火山の噴火によって地下にあったものが急激に空気中に飛び出すことによって、火口付近の気圧が変化し、それが空振となるが、到達距離は非常に大きく数千 km も届くことがある。ほとんど利用価値のない低周波音であるが、天候不良で火山の監視が難しい時でも、低周波のマイクロフォンであれば、火山噴火を検知できるため、気象庁や大学などが火山監視のための「空振計」を設置している。

なお、英語で超音波は ultrasonic、低周波音は infrasonic であり、光の場合の紫外線 ultraviolet、赤外線 infrared と接頭語が同じ関係にある。（音よりも速い超音速は、ウルトラではなくスーパーを使う、supersonic speed）

周波数以外の音の情報として、音の圧力が重要である。音の圧力を表わすのに、圧力の基準値に対する比の常用対数である「音圧レベル」が用いられる。

$$L_p = 10 \times \log_{10}(P^2/P_0^2) = 20 \times \log_{10}(P/P_0)$$

ここで、 L_p は音圧レベル（デシベル、dB）、 P は瞬時音圧の実効値 [Pa]、 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ は、基準圧力である。

基準圧力 $20 \mu\text{Pa}$ は、健康な人間の最小可聴音圧とされ、可聴域であっても、これよりも圧力が低いと聞き取れないとされる非常に小さな音量である。ガスの圧力や気圧と同じパスカルという単位を使うが、この基準圧力の値は、気体の圧力と比べると桁外れに小さく、超高真空の圧力と同程度である。

上式の対数の中を見て分かるように、音圧レベルは、音圧と基準圧力の比ではなく音圧の二乗と基準圧力の二乗の比で評価されている。基準圧力と同じ音圧は、0dB であり、その音のエネルギーは、 10^{-12}W/m^2 である。一方、列車が通過するガード下の騒音レベルに相当する 100dB の音のエネルギーは 10^{-2}W/m^2 である。0dB と 100dB では、音圧比で 5 桁、エネルギー比では 10 桁異なるという関係になる。

大きなエネルギーを持つ音は騒音（noise pollution）となりうる。他の工業と同じ

ように産業ガス、高圧ガスを取り扱う時にも、騒音公害の発生を防止するための注意が必要である。ガスの製造現場などでは、回転機類の出す機械騒音、高圧ガスの放出音（フロー音）、装置の切り替えに伴う音、配管の振動音、送ガス音などが、主な音源となる。

騒音に関する法令としては、環境基本法（環境基準）、騒音規制法がある。

騒音は、同じ音圧レベルであっても、周波数の違いによって異なる大きさの音として認識されるため、周波数による重み付けで算出した音圧レベルで評価される。これを、「聴覚的音圧（ラウドネス）」と呼び、その単位フォン（ホン）は、ISOで詳細に規格化されて、騒音を示す単位として用いられてきた。しかし、ラウドネスと音圧レベルとの相関が非常に複雑なため、現在は、周波数特性と時間特性を考慮した騒音レベル（dB）に置き換えられるようになり、計量法は、1997年に騒音の単位からホンを廃止、dBに移行した。したがって、それ以降の騒音計は、ホンではなくdB表記となっている。

騒音に関する法令等は大きく変わり、「環境基本法」（1999年4月）「環境影響評価法（環境アセスメント法）」（同6月）、「騒音規制法」（2000年4月）と続けて改訂・新設され、騒音測定の指針であるJIS規格（Z8731）の大幅な見直しも行われた。

(3) 光の情報

●波としての光

「音」は、マクロスコピックの階層における弾性波であり、気体、液体、固体、プラズマ中などの媒体を伝播する。弾性波は弾性体を変形させながら進む波であり、媒体を必要とし、真空中は伝わらない。

これに対して光は、ミクロスコピックの階層における横波であり、量子であり、媒体を必要とせず真空中でも伝わる。真空ポンプや空気ポンプが発明され、ボイルの法則が見出された頃より、音は真空中を伝わらず、光は真空中を伝わるのが実験的に知られていた。

光は「波」として研究されていた時代が長いが、アインシュタインが光量子 (light quantum) 仮説を提唱(1905年)、粒子性が実験的に確認され、その後、光子 (photon) と命名された (1927年)。

17世紀後半に始まる、光が粒子であるか波であるかという問題は、物理学における非常に大きな課題であった。アイザック・ニュートンが「光の粒子説」を提唱(1672年)、ロバート・フック(1672年)やクリスティアーン・ホイヘンス(1690年)が「光の波動説」を提唱した。ニュートンは、太陽光をプリズムで分光すると虹が現われることから、光は様々な粒子の混合物であると提唱したが、その後の様々な研究や実験結果が光の波動説を説明したため、19世紀には科学の主流は光の波動説がとなり、粒子説は退けられるようになった。

多くの科学者は、光が波であるのなら、太陽から地球まで光が届くには、宇宙空間に光を伝播する媒体が存在しなければならないと考え、ホイヘンスが提唱した光の媒体「エーテル、ether」を探し始めることになった。

しかし、20世紀になって、アインシュタインは、光は粒子と波動の二重性を持つ光量子であるという光量子仮説を提唱し、特殊相対性理論の中では、光は媒体を必要としないことを示した。その後、光を伝播する媒体エーテルが存在しない(必要とされない)ことが、実験的に確かめられ、光は波であり粒子であり、光量子であることが分かり、200年以上にも及ぶ光の波動説と粒子説の議論に決着がつけられた。光は波であるという観測事実と、光は粒子であるというもうひとつの観測事実から、光は光量子という量子であるという真実(光の本質)は、人間の階層の感覚や常識からは理解しにくい、量子の階層では、正しい自然の姿である。(→「2.3」量子力学、「2.4 相対性理論」)

光は、電磁場の影響を受け(ファラデー効果、1845年)、マクスウェルの方程式(1865年)によって電磁波であることが予測されていた。一方、電磁波も光と同様の反射や屈折の性質を持つことから、光は電磁波の一種であることが知られて

いた（1888年、ヘルツ）。

現在、光子を表わす粒子記号は γ であるが、これは、アーネスト・ラザフォードが命名した電磁波の一種である γ 線（ガンマ線、1903年）と同じである。光も γ 線も同じ電磁波であるため、区別されずに同じ記号が用いられている。

補足 2-14：ニュートンの光の粒子説

ニュートンが関わる紛争は多いが、17世紀末に始まるニュートンの「光の粒子説」と他の研究者の間の「光の波動説」の場合は、紛争ではなく、れっきとした科学の論争である。18世紀から、さらに19世紀、20世紀初頭まで続いた。

19世紀になって、光の実験や理論が進み、次第に光の波としての性質が明らかになり、同時に、光の粒子説を否定する事実も明らかになっていった。たとえば、ニュートンの光の粒子説では、光の速度は空気中よりも水中の方が速いとされていたが、レオン・フーコー（1819～1868年、フランス）が行った光速測定実験（1850年）によって、観測される光の速度は空気中よりも水中の方が遅いことが分かった。

ニュートンは虹の研究が知られるが、光の屈折を、光の粒子が物質の境界面で引き込まれる現象であると考え、密な媒質の方が疎な媒質よりも速いと考えていた。音（縦波）は、密な媒質中の方が速いが、ニュートンは、光は粒子であり、音とは別の理由で密な媒質中を速く進むと考えていたようである。

また、媒体による光の速度比は、波動説のホイヘンスの原理（法則）に基づく屈折率から得られる速度比に等しいことが示され、トマス・ヤングが示した「光の横波説」（1817年）が確かなものとなっていった。

アインシュタインは、量子説によってニュートンの光の粒子説が一部正しいことを示した。しかし、同時に、特殊相対性理論ではニュートン力学の基本原則である絶対時間と絶対空間の概念を否定、一般相対性理論では万有引力の法則の欠陥を指摘して、これを書き換え、ニュートンの科学を完全に過去のものにした。

●光の波長

図 2-2-8 に光の波長領域を図示する。前述のように光（電磁波）の場合、振動数や周波数ではなく波長で表わすのが一般的であるが放送電波では周波数も用いられる。

電磁波のうちヒトの目で見えるものを可視光線（可視光）と呼ぶ。その波長の下界は波長 360～400nm（紫色）、上界は波長 760～830nm（赤色）とされている（JIS

の定義)。境界値である上限、下限ではなく、可視光線の波長の有界な集合を表すために上界、下界と表現しており、境界はややあいまいである。

可視光線は、短い波長 360nm～長い波長 830nm ほどの間にあり、ヒトの目は、波長の違いを「色」として認識するようになっている。波長が短い光を「紫」と感じ、波長が長い光を「赤」と感じる。

色とは、人間が光の波長の違いを感覚に変換して、それを表現したものである。したがって、光には「色」という性質、物性がない。音と光は、様々な波長の波が合成されて伝わり、ヒトはその混じった状態から情報を変換して認知しており、このような量は、「心理物理量」といわれる。心理物理量は、聴覚（音色、音程、騒音）、視覚（色彩、色相、彩度、明度、光度、光沢）、味覚、嗅覚などの感覚器によって科学的物理量から作り出されている。

紫色 (violet) よりも波長が短い光を「紫外線 (ultraviolet、UV、紫外光)」、赤色 (red) よりも波長が長い光を「赤外線 (infrared、IR、赤外光)」と呼ぶ。ウルトラ ultra-は「上」、インフラ infra-は「下」を意味する接頭語であるが、日本語では両方に「外」の字をあてて、赤外、紫外としている。

音は縦波（粗密波、固体中では横波もある）であり、光は横波である。伝播の仕組みが異なる

り、感覚器の構造もその変換の方法も異なるが、人が感じることができる知覚可能範囲を周波数や波長と比較すると、可聴音の周波数は、3 桁 (20Hz～20kHz) もあるのに対して、可視光の波長領域は、わずか 2 倍 (360nm～830nm) しかない。

赤外線は熱として、紫外線は人体への有害な反応として感じたり影響が現れたりするため、ヒトが感じる光は可視光だけではないが、視覚に限定するとその範囲は非常に狭い。しかも聴覚とは異なり、情報は、ほぼ前方のみであり、壁の向こうも見えない。波として知覚される範囲としてみると、光の情報量は音の情報量

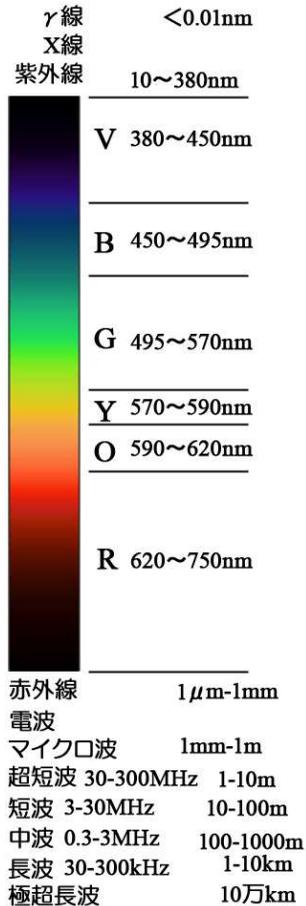


図 2-2-9-可視光線とその他の電磁波の波長領域

に比べて極めて少ない。百聞は一見にしかずは、逆転し、情報は音の方が1000倍ほど多い。しかし、ヒトの場合は、音源からの音や反響音によって対象物の形状や距離などの情報を再現することは非常に難しく、空間の認識の能力は視覚の方が優れている。

可視光線よりも波長が長い赤外線からさらに波長が長くなると「電波 (radio wave)」になる。可視光線よりも波長が短い紫外線よりもさらに波長が短くなると「極端紫外線」や「X線」になる。

光(可視光線)も電波も紫外線も、波長が異なるだけで、全て同じ性質を持つ波(電磁波)と考えることができ、自然界にある電磁波の波長は、短い方は、ガンマ線 0.01nm(周波数 2×10^{18} Hz)、長い方は、マイクロ波 0.001~1m(300MHz~3THz)から極超長波 100~10万 km (3~3000Hz)まで、およそ18桁もある。波長と周波数を混ぜて使うこともあり、放送電波の種類を中波、短波、マイクロ波などの波長の長さで呼ぶが、放送チャンネルは、波長ではなく、周波数(単位はkHzやMHzなど)でしている。

光(電磁波)全体の波長領域は、18桁もあって極めて広いが、ヒトの視覚がとらえることができる波長は、ごくごくわずか 360nm~830nm (405THz~790THz)しかない。したがって、自然を観測するときに「見る」というのは、非常に重要な観察方法であるが、可視光線は、自然界のごくごく一部しか映し出していない。

前述のように、波長の違いは、ヒトの感覚として「色」に変換され、脳の情報処理によって空間が認識されている。したがって、三原色という考え方は、ヒトの錐体細胞が3つの吸収色素を持つことに由来している。色覚の研究は、ジョン・ドルトンが、自らの色覚異常に気付いて行った研究が始まりとされている。18世紀から19世紀にかけてトマス・ヤングとヘルマン・ヘルムホルツが色覚や原色の研究を行っている。

光には「色」という特性がなく、色は受け手側の感覚であるため、三原色の概念も、多くの人には共通しているが、人によっては、錐体細胞の数や種類が異なるため完全に共通のものではない。三原色は、もともと4色型(魚類、両生類、鳥類)や2色型(哺乳類)の細胞を持つ動物には当てはまらないものである。

自然界には色がなく、これは動物の感覚器独特のものである。したがって、可視光線の領域は非常に狭いが、その赤から紫までの色として認識されるものもその感覚は人によって様々ということになり、色の数や名称は、国や民族によってかなり異なっている。物理の教科書では、図2-2-8のように可視光線のスペクトルを6色で示すことが多いが、虹の色数は、地域や文化によって異なり、2色や3色の地域から、世界的には5色や6色で表現する地域が多い。アイザック・ニュート

ンは虹の研究が有名であるが、当時 5 色とされていた英国の虹の色を音階にならって「7 色」としている。図中の波長と色の名称の關係は、便宜的なものであって、境界線や明確な区分もない。色の種類、呼び方は科学の領域ではない。

●粒子としての光、光の検知

可視光線の波長領域はわずかであり、ヒトの目でとらえることのできない光（電磁波）の領域の方がはるかに広い。ため、可視光線以外の光を測定する方法が数多く開発されている。

ただし、光は、質量を持たない素粒子であり、光そのものを直接検知することはできない。検知されるのは光ではなく、そこに光があったという光の痕跡（光による反応の結果）である。

たとえば、ヒトの目では、光の持つエネルギーが、視細胞で電子に変換され、その結果、感覚細胞が刺激されて視覚情報が得られる。光は電気の信号に変換されて、脳はこれを映像の情報として認識する。映像を映し出し視神経に情報を送るヒトの網膜は、およそ厚さ 0.2mm×直径 40mm の平面である。現実の空間は 3 次元であるが、ヒトの目の構造は 2 次元の面に映像を投影、脳は両眼視差の映像を情報処理して、これを 3 次元の映像として知覚するという立体視の仕組みを持っている。

フィルム、撮像素子など光をとらえる計測器も、光を電気に変換して検知するという点ではヒトの目と同じである。写真フィルムでは、光を化学反応の痕跡として記録、デジタルカメラでは、撮像素子（イメージセンサ）に入射した光によって起こる内部光電効果で生成される電子を検出して画像情報を得てデータを記録する。新しいデジタル技術の対義語としてアナログという言葉がよく使われるが、カメラの場合は、デジタルカメラの対義語はアナログカメラではなく銀塩カメラ（銀塩フィルムを用いたカメラ）と呼ぶ。デジタルカメラも銀塩カメラも光による反応を記録するという点では同じであり、記録方式がデジタル化された数値情報であるかフィルムの化学変化であるかという点だけが異なる。

光は、質量を持たず止まることができない素粒子であり、反応して光速度でなくなった時には既に光ではない。光は別のものに変換されて検知され観測は全て間接的なものであり、痕跡・記録だけが残る。しかし、光が電子などに変換される過程はほとんど意識されることがなく、光によって得られる情報は「直接見た」と報告される。映像は、ありのままの真実だと思われることが多いが、ヒトの目もカメラも様々な反応過程やデータの加工がなされた結果の情報であり、観測は常に間接的である。しかも、光は有限の速度で移動し、検知や認識にも時間が必要であるから、目の前で見えているものですら「同時」ということはありえない。

いつも、本の少し前の過去の光を変換して間接的に認知していることになるが、その速度は、非常に大きいため時間のずれを感じることはない。

観測が間接的であるという同じようなことが、光だけでなく、他の物理量の観測でもよく起こる。たとえば、温度は、分子運動のエネルギーに伴う物理量（スカラーの状態量）であるが、温度そのものを計測することはできない。

一次温度計は、気体の圧力や容積などから熱力学的に求める温度計である。しかしこの場合も、「温度」という量を直接測ることはできない。温度には実体がなく、温度目盛も熱力学温度になるように人間が決めたものであるため、その精度には限界がある。

一般的に用いられる温度計では、ある対象物の温度を測定する時に、測定器の感温部（温度センサー、測温体）と対象物が同じ平衡温度になっていると仮定して、温度計の指示を読む、あるいは、対象物から放射される光を分析して温度を「推定」する。このような温度計を二次温度計と呼び、感温部には、温度によって容積が変わる液体、温度によって電気抵抗が変わる金属、あるいは、温度差によって熱起電力を発生する異種金属接合などの物性を利用する「温度計」が用いられるので、測定される「温度」は、対象物そのものではなく温度計の温度であり、さらに温度そのものが測定されるのではなく、温度との相関関係のある物性から間接的に求められた温度の推定値である。

重量や圧力も物体の変形や電位によって測定されるが、ほとんどの測定器が物理量を直接とらえておらず、その物理量と何かの法則によって相関関係のある何かの性質を用いている。したがって、通常の測定で得られている情報のほとんどは、間接的に得られているものであって、おそらく、直接検知できる物理量というのは、整数で数えられる「個数」くらいしかないが、これも一般的には、アヴォガドロ定数を掛けたほどの数であるため、現実的には数えることができない。実験データや装置の運転データを「生データ」と「加工されたデータ」に区別することがあるが、基本的に全てが間接的なデータである。

そこまで厳密に考えず、より現実的に考えて、最初に得られるデータを一次データ、何らかの計算が行われたものを加工されたデータとすることが多い。しかし、通常の計測器では、測定された量が、何らかの法則を用いて変換され、回路や演算による加工が施されて、計測器やコンピュータによって表示されていることが多いので、何も加工されていない本当の「生データ」はほとんどない。

温度計であれば、温度によって変化する測温部の抵抗値の変化や温度差によって生じる起電力を測定するが、計測器内部の回路でこれを電圧などに変換、演算回路や変換プログラムを用いて最終的に温度表示をしているので、生データどころ

か、かなり加工されたデータである。したがって、所定の精度を得るには、測温の仕組みや方法だけでなく、測定器内部の回路やソフトウェアなどの内容を理解し、校正管理、感温部や機器の品質管理を十分に行う必要がある。測温が正しく行われ、回路から得られる電圧や電流値が正しく得られたとしても、そこから温度に換算される時にエラーが生じることもありうる。過程、ステップが多ければ、それだけエラーの可能性は高くなるので、表示される温度を信じる前に確かめなければならないことはいくつもある。

たとえば、深冷空気分離装置の熱交換器では、流体間の温度差が1K前後という非常に小さな温度差で運用されることが多いため、熱交換器の設計に必要な伝熱の研究では、再現性のある実験データを得ようとすれば0.1K以下の精度と確度が必要となる。

精度 (precision) は再現性に関わり、確度 (accuracy) は、物性など他のデータベースとの間の整合性に関わる重要な因子であるが、このような精密な測定で、必要な精度と確度を達成するのは容易ではない。温度計 (感温部、回路)、測温方法 (熱抵抗など)、基準温度計との校正、品質管理などに細心の注意が必要である。測定器の表示を鵜呑みにするのではなく、その表示がどのようにして得られているのかということを理解し、意識することが、重要である。

流量計であれば、その測定方法 (差圧式、熱式質量流量、熱線式、熱電対式) が様々であるだけでなく、検量 (校正) した時の条件と測定した時の条件 (温度、圧力、組成など) の違いや、それが正しい方法で補正されているのか、といったことに注意が必要である。

深冷空気分離装置では、流体の組成が変化するため、密度が変わり、流量計の指示値が変わるが、流体をサンプリングして組成をリアルタイムで分析、物性推算を行って流量の補正を行うという作業は簡単ではない。商業装置の場合は、温圧補正 (温度と圧力の違いから流量を補正) が行われることが多いが、組成の変化に対応することは難しいことと極端に異なる組成で運転されることがないことから、通常は組成の補正は行われない。

実験装置の場合は、実際の組成を知ることが重要であるため、これに対応した測定が必要であるが、低温装置の場合、特に液体サンプリングの技術的難度が高く、重要な実験のテクニック・ノウハウとなっている。たとえば、低温の液体空気をサンプリング配管からそのまま採取すると、配管内での蒸発に伴う気液平衡・物質移動によって組成が変わり、採取された気体は、実際の液体よりも窒素濃度が高くなる。

(4) 光と電気による観測

光は、ほとんどの場合、電気に変換されて検知される。光と電気の変換反応は、比較的古くから知られているが、はじめは、電気と温度や圧力との関係を示す現象から見出された。

18世紀、物質が温度の変化に応じて電氣的ポテンシャルを生ずることが、カール・フォン・リンネ（1707～1778年、スウェーデン）によって見出された。カール・フォン・リンネは「分類学の父」であり、最も有名な生物学者のひとりであるが、当時の博物学は、生物も無生物も研究対象としており、リンネも植物界・動物界・鉱物界の研究を行っていた。鉱物の研究から温度と電気には関係があることは見出されたが、温度変化を電圧として取り出して研究するところまではできなかった。

19世紀になって、アントワーヌ・セザール・バクレル（1788～1878年、フランス）は、これを温度変化による誘電体の分極の変化として研究、再発見した（1819年）。後にデビッド・ブリュスター（1781～1868年、スコットランド）が、これを「焦電効果（pyroelectric effect）」と名付けた（1824年）。

バクレルの実験からは、大きな成果は得られなかったが、60年後、ジャック・キュリー、（1856～1941年、フランス）とピエール・キュリー（1859～1906年、フランス）兄弟によって結晶構造体の焦電性が確認され、「圧電効果（piezoelectric effect）」として理論化された（1880年）。ただし、一般的には、圧電現象は、1819年にバクレルによって発見されたと記録されている。圧電体に圧力を加えると分極が現れる圧電効果は、圧電素子（ピエゾ素子）として実用化され、現在では、点火装置、ソナー（SOund Navigation And Ranging, SONAR）、スピーカー、水晶発振器、アクチュエーター、各種電子回路、各種センサー、インクジェットプリンターなど様々な機械に応用されている。

アントワーヌ・セザール・バクレルが行った応力と電気を結びつける焦電効果の実験はうまくいかなかったが、これらの研究は、電気化学の発展に大きく寄与し、アントワーヌは、息子のアレクサンドル・エドモン・バクレル（1820～1891年、フランス）とともに、溶液中の金属電極に光を照射すると起電力が生じる現象、光起電力効果（photovoltaic effect）を発見（1839年）、バクレル親子が発見した光起電力効果は「PV効果」とも「バクレル効果」とも呼ばれている。

続いて、ハインリヒ・ルドルフ・ヘルツ（1857～1894年、自由ハンザ都市ハンブルク）が、光電効果（photoelectric effect）を発見（1887年）、物質にエネルギーの大きな光（紫外線）を当てると電子が飛び出す現象が見出された。

ヘルツは、電磁波を発見（1885年）、電磁波が何も無い空間中を伝播し、その速度が光速に等しいことなどを見出した。ヘルツが発見した光電効果は、後にアインシュタインによってその機構が説明された。なお、ボーアの原子模型を検証してノーベル物理学賞を受賞（1925年）したグスタフ・ルードヴィッヒ・ヘルツはハインリヒの甥、医療

用の超音波検査装置を発明したカール・ヘルムート・ヘルツはグスタフの息子である。3人のヘルツが、電磁波、物質波、音波の分野に名を残したが、SIの周波数の単位ヘルツ（Hz）はハインリヒに因む。

光と物質の相互作用が次々と明らかになっていったが、アントワーヌ・セザールとアレクサンドル・エドモン・ベクレル親子が発見した光起電力効果（PV）は、その後、電解質溶液だけでなく、半導体のpn接合や、半導体と金属との接合部などでも発生することが分かった。しかし、光が電気に変換される現象は、その変換効率が極めて低いため、視覚信号への変換としては十分であっても、電力として取り出すことは難しく、光を電力に変換する発電機が発明されるのは、発見から100年も後のことである（1954年、米国ベル研究所）。

半導体を用いて、光起電力を外に取り出すことで得られる「光電流（光電子）」を利用する機器をPVセル（photovoltaic cell）と呼ぶ。太陽電池（solar cell）と呼ぶこともあったが、光起電力を用いる発電は、光源を太陽光に限定されるものではなく、また電池という呼び方も誤解されやすい。英語のcellを電池と訳すと「太陽電池」や「燃料電池」のようになるが、いずれも電力変換器（発電機）であって



カール・フォン・リンネ
(1707～1778年)
(Wikipedia)



アントワーヌ・セザール・ベクレル(1788～1878年) 焦電効果、PV効果



アレクサンドル・エドモン・ベクレル(1820～1891年)、PV効果



アントワーヌ・アンリ・ベクレル(1852～1908年) 放射線の発見

図 2-2-10-圧電効果、光電効果、放射線の研究を行った人々① (写真は Wikipedia)

蓄電池ではないため、最近では、cell を電池と訳さずに、PV (photovoltaics) や FC (fuel cell) といった言葉が使われるようになっている。太陽光発電機器の展示会を PV 展、PV エキスポなどと呼ぶようになり、PV は日本語としても定着しつつあるが、その起源は、アントワーヌ・セザールとアレクサンドル・エドモン・ベクレ

ル親子が 180 年前に発見した PV 効果、ベクレル効果である。

アレクサンドルの息子のアントワーヌ・アンリ・ベクレル(1852~1908 年、フランス)はウラン鉱から放射線を発見したことで知られる(1896 年)。ファーストネームが、ベクレル効果で知られる祖父と同じアントワーヌなので、ミドルネームから、アンリ・ベクレルと呼ばれることが多い。

アンリ・ベクレルが発見したウランから発せられる X 線に似た透過力のある光線は、当初は謎にまつまれているが、これを学位論文のテーマにしたいと考えたマリ・キュリー(1867~1934 年、ポーランド)

がアンリに依頼、アンリはマリの指導教官をすることとなった。この研究が、新元素ラジウムの発見、放射線の発見につながり、アンリ・ベクレルは、マリ・キュリー/ピエール・キュリー夫妻とともにノーベル物理学賞を受賞した(1903 年)。

アンリの息子ジャン・ベクレルも結晶や電場を専門とする物理学者で、アインシュタインの相対性理論をフランスに広めることに貢献、19 世紀から 20 世紀初頭のベクレル家は、4 代に渡る物理学一家である。ベクレル効果 (PV 効果) は、アントワーヌ・セザール・ベクレルとアレクサンドル・エドモン・ベクレル、「太陽光発電の研究に贈られるベクレル賞」はアレクサンドル・エドモン・ベクレル、SI における放射能の単位ベクレル (Bq) はアントワーヌ・アンリ・ベクレルにそれぞれ因む。

世界には、見えないものや聞こえないものがたくさんあり、人々は昔から、その



図 2-2-10-圧電効果、光電効果、放射線の研究を行った人々② (写真は Wikipedia)

正体不明の何かに囲まれていると考えてきた。見えない何かを見るように、自然を探求し、理解しようと、観察道具を作り、見えない階層を理解する科学を発展させてきた。自然は、下の階層に支配されるという仕組みからは逃れることはできないが、観察して、そこにある法則を調べ、対処する方法が考えられてきた。自然界には伝染病という見えない脅威がある。病原菌やウィルスなどの外敵を排除するためにヒトの体には自然の免疫力がある。しかし、それだけでは対抗できないこともある。欧州で14世紀に起こったペストの流行では全人口の1/3という莫大な犠牲者を出し、17世紀、フックやニュートンの時代の英国でも多くの犠牲者を出した。ポイルが錬金術を化学に変え、フックが高性能の顕微鏡を製作し、科学の時代が始まったが、当時の科学ではまだペストの正体を突き止めることはできず、見えない大きな脅威が存在した。それから200年もたって、19世紀の末、香港からインドシナに広がったペストを追って、アレクサンドル・イェルサン（1863～1943、フランス）と北里柴三郎（1853～1931年、日本）が渡航、それぞれペスト菌を観察、発見した。ペスト菌の大きさは、約 $1\mu\text{m}$ 程度、現在の電子顕微鏡の技術があればはっきりと映像として観察ができる。しかし、当時は、観測方法も対処法も十分に確立されていない時代である。先駆的な研究者によってペストが発見された。

人間が本来持つ免疫力に任せるべきという考え方もあるかも知れないが、人々は微生物の脅威をそのまま受け入れるのではなく、見えないものの正体を探し、対処する方法を研究してきた。古来より様々な薬が考案され、20世紀になって、抗生物質が発見された。アレクサンダー・フレミング（1881～1955年、英国）がペニシリンを発見（1928年）、人工の抗生物質の大量生産に成功し、多くの人々が感染症から救われ、フレミングはノーベル医学生理学賞を受賞した（1945年）。

病原体の感染の影響を防いだり和らげたりするために、世界各地で予防接種という方法がとられている。現在、日本では乳児・幼児が就学前に受ける定期・任意のワクチン予防接種は17種類ほどもあり、ヒブ、小児用肺炎球菌、4種（ジフテリア・百日せき・破傷風・ポリオ）、結核、麻疹・風しん、日本脳炎、ロタ、B型肝炎、おたふくかぜ等、接種スケジュールを考えるだけでも簡単ではない。それだけ多くの種類の見えない脅威にさらされており、多くの対処法がみつまっているということである。

病原菌やウィルスだけでなく、電気や電波、電磁波、放射線など、見えないものは、大変な脅威になり得る。しかし、自然界には、電気や電磁波も大量に存在し、文明社会は、さらに大量の人工の電気や電磁波を生み出している。電気や電波によって多くの便利な道具が生まれている。電気の脅威を減らすには、人工の電気の利用を止めればよいのだが、電気があるリスクよりも電気がないリスクの方が

はるかに大きい。見えない脅威を理解し、これを利用することによって現代社会が成り立っている。

電気の利用は、20世紀後半からの文明社会を大きく進歩させたが、電気（電子）の階層は、極端に小さく、電気の実体を理解することは非常に難しい。ヘンリー・キャヴェンディッシュ（1731～1810年、イングランド）とシャルル・ド・クーロン（1736～1806年、フランス）によって電磁気学におけるクーロンの法則が見出されたのは18世紀後半（1785年）であるが、これが理論的に解明され、ジェームズ・クラーク・マクスウェル（1831～1879年、スコットランド）によってマクスウェルの方程式が導かれたのは、80年も後、19世紀の中盤（1864年）である。

マクスウェルは、ファラデーの電磁誘導の法則、アンペールの法則（電流による電場の発生）、ガウスの法則（電場）とガウスの法則（磁場）の4つの法則を統合し、古典電磁気学を確立した。マクスウェルの方程式には、磁束保存の式、ファラデー—マクスウェルの式（電磁誘導）、ガウス—マクスウェルの式（電荷）、アンペール—マクスウェルの式（変位電流）といった重要な式が含まれ、これらの方程式から得られる帰結によって、電場と磁場が電磁場として統合され、光が電磁波であることも導かれた。しかし、それを記述する時空には、それまで信じられてきたニュートン力学が適用できないという重大な問題が提起され、この課題が、アインシュタインの特殊相対性理論によって解決されるのはさらに40年も後のことである。

雷や静電気によって人々が電気の存在を知ったのは、紀元前ともいわれる。電気は、250年前のクーロン、200年前のファラデー、150年前のマクスウェル、110年前のアインシュタインと長い時間をかけて解明され、現代物理学の成果として、その利用技術は、20世紀後半から21世紀にかけて急速に発展した。見えない脅威「電気」も、現在ではなくてはならない文明の道具となっている。

表 2-2-9-光電効果と熱電効果

年	人物	発見	内容
18 世紀 中盤	カール・フォン・リンネ	後の焦電効果の発見	
1819 年	アントワーヌ・セザール・ベクレル	焦電効果の再発見	温度変化による誘電体の分極の変化
1821 年	トーマス・ゼーバック	ゼーバック効果	温度差が電圧に直接変換される熱電効果
1834 年	ジャンニシャルル・ペルティエ	ペルティエ効果	異種金属接合に電圧をかけると、接合点発熱吸熱が起こる熱電効果
1839 年	アントワーヌ・セザール・ベクレル アレクサンドル・エドモン・ベクレル	光起電力効果、 ベクレル効果	光を電気に変換、PV 発電
1851 年	ウィリアム・トムソン (ケルビン卿)	トムソン効果	温度の差がある2点間に電流を流すと発熱吸熱が起こる熱電効果
1880 年	ジャック・キュリー、 ピエール・キュリー	圧電効果	ピエゾ素子
1887 年	ハインリヒ・ヘルツ	光電効果	物質にエネルギーの大きな光を当てると電子が飛び出す
1895 年	ヴィルヘルム・レントゲン	X 線の発見	気体の研究中に放電を行っている時に発見
1896 年	アントワーヌ・アンリ・ベクレル	放射線の発見	
1905 年	アルベルト・アインシュタイン	光量子仮説	波であると思われた光に粒子性を導入
1916 年	ロバート・ミリカン	光量子仮説の実証	光電効果の定量的実験
1923 年	アーサー・コンプトン	コンプトン効果	電磁波が粒子性をもつことを証明

2. 2. 1. 5 大気と空気の階層

ガスは、ガス分子からなり、およそ 10^{10} m の階層にあるので、この大きさの常識が通用する。しかし、同じガスでも、その圧力が異なると密度、分子間の距離が異なり、挙動が全く異なることがある。われわれが原料にしている空気は、地球を取り巻くガス・大気の一部であるが、大気は様々な異なった特徴を持った構造を持っており、高層大気と地表付近の大気（空気）は、同じ性質を持っていない。空気の常識は、他の大気には通じない。

地球の大気は、地表からの高度 10^7 m までである。地球大気とは、地球を取り巻く気体（ガス）とプラズマである。境界は明確ではないが、これ以上の高さには、大気がないと考えると、ここまでが「地球」であり、その先が地球外の宇宙である。高層では、大気が非常に希薄で、気体の原子や分子は、大きく離れている。分子と分子の距離が遠く、分子間力が働かないため、気体としての振る舞いが地表付近の空気とは大きく異なっている。また、原子のままであっても近くには他の原子がないため、結合して分子になることができず、単原子のままでも安定である。

高層の大気（熱圏よりも上）では、窒素や酸素の原子あるいは分子、オゾンなどが高さ方向に分かれて分布している。地球の重力によって軽い分子、原子が上にあり、重い分子が下にある。熱圏では、下から上に、窒素分子、酸素原子、ヘリウム原子の層があり、これらは混じらず、重さの順に積もるように存在している。

しかし、高度 50~80km 以下の中間圏、高度 50km 以下の成層圏、高度 20km 以下の大気「対流圏」では、酸素、窒素などの分子は、お互いに混ざり合い、混合ガスとして長期間にわたって安定して存在しており、高さ方向には組成の分布がない。

最も底層の対流圏の大気を「空気」と呼び、日常的に知っている空気の常識が通用する。

対流圏では、高度が高くなって太陽に近づいても気温は下がるという性質があり、山に登ると気温が下がることが常識であるが、これは、対流圏の常識であって、大気他の部分には通用しない。空気は、上で温度が低く密度が大きい、下で温度が高く密度が小さい。上が重く下が軽いため、上下に混ざりやすく、空気は高さによらず組成が一定となっている。地球の大気は、地球の重力によって地球表面に積もっているが、対流圏の気体は十分に混ぜられており、混合ガス=空気として存在している。世界中どこでも空気の組成は同じであり、ゲイ=リュサックとフォン・フンボルトが発見したように高さ方向でも組成は変わらない。

高山に登ると空気は希薄になり含まれる酸素の量が少なくなり息苦しくなるが、

空気中の濃度が一定である酸素は、高度が上がっても薄くならない。また、縦に深い穴を掘れば、穴の底では気圧高度が低くなり、上に乗っている大気の量が多くなる分、大気圧が上昇するが、穴の底にあるのは空気であって、重いアルゴンだけが分離して沈むことはない。十分に混合されたガスである空気は勝手に分離しないので、高く登った山の上で酸素が薄くなったり、低い穴に潜ってアルゴンが濃くなったりはしないのである。

空気のように、一旦、混合されてしまったガスを分離するには、分離するための仕掛けと分離するエネルギーが必要である。熱力学的に考えると、十分に混合された空気は、エントロピーが大きくなっており、これを酸素や窒素に分離するためにはエントロピーを減少させるということを「人為的に」行わなければならない、そのためのエネルギー（低エントロピー資源）が必要となる。空気中の各成分が自然に分離して、濃くなったり薄くなったりはしないので、仕組みとして「分離技術」、仕掛けとして「分離装置」が必要となり、分離に消費されるエネルギーが「製造コスト」となり、空気分離のプロセスと産業ガスのビジネスが成り立つ。

もし、空気がひとりでに分離するのであれば、酸素を分離するというガスビジネスが存在しないが、それ以前に快適な人類の文明が存在しない。低地と高地で酸素が薄く、中間のところで酸素が濃いのであれば、上下で窒息、真ん中ではいつも大火事になってしまい、地球上には生存可能な場所がほとんどない。大気の最も下にある実際の「空気」は非常によく混じった混合気体である。

混合ガスが勝手に分離しないのは、空気だけではない。十分に混合された高圧ガスを充填した容器の中でも、重いガスが沈んだり、軽いガスが浮き上がったりのないで、いつまでたっても分離しない。ドレッシングの容器の中の油のようにはならないのである。

産業ガスの商材のひとつである「混合ガス」は、分析用の標準ガスなどに用いられ、高圧ガス容器の中に数種類の純ガスを充填して、ブレンドして製造される。混合ガスを調整する方法には、容器ごと台秤でガスの重さを測る、流量で調整する、あるいは圧力で調整するなどの方法があるが、最終的には、分析計で測定された組成が重要である。

しかし、製造直後の混合ガスは、十分に混合されておらず、容器内のガスの濃度は均一ではない。充填圧力が高く拡散・混合に時間がかかるので、すぐにサンプリングしても正しく分析することができない。そこで工程を進めるために容器を外部から加熱することが行われるが、早く万遍なく温まるように容器をローリングさせることがある。しかし、このような作業が必要なのは、ガスを混合した直後であって、一度混合されたガスは分離しないため、容器から取り出す時は、同じ組成であ

る。ガス中の特定の成分が重さでひとりでに分離して組成が変わるということはない。ガスが重さで分離するには、地球の高層大気のように、分子間力が働かないほど極端に希薄な条件が必要である。

ただし、反応性の高い成分を含むガスを充填した高圧ガス容器では、長期間のうちには、容器の金属とガスが反応して組成が変わる可能性がある。品質を保証するためにガスの使用期限が定められる。

2. 2. 1. 6 見えない気体を記述する

ガスを取り扱うということは、分子を取り扱うということである。しかし、ガス分子がどういうものか、その種類や性質などが明らかになってから、まだ100年ほどしかたっていない。150年前、将来、酸素ガスや窒素ガスが大量に製造され、それを取り扱う企業や産業が現れるということを誰も想像できなかったに違いない。

分子や原子は、電子に比べると桁外れに大きい、それでも人間とは、10桁も階層が異なるため、それを調べ理解することは容易ではない。20世紀初頭から始まる新しい物理学のおかげで、われわれの時代は、それを学び利用することができるようになったが、この階層で起こっていることを理解するには非常に長い時間がかかっている。

350年前に、ボイルの法則(1662年)が見出され、その140年後にシャルルの法則(1802年、ゲイ=リュサック)、ドルトンの法則(1803年、分圧の法則)が見出され、19世紀初頭には、理想気体(ideal gas)の概念が定式化された。

当時の道具や理論では、ガス分子そのものにはたどり着くことはできなかったが、ロバート・ボイル(アイルランド)、ジャック・シャルル(フランス)、ジョン・ドルトン(イングランド)、ジョセフ・ルイ・ゲイ=リュサック(フランス)、アメデオ・アヴォガドロ(イタリア)といった科学の天才たちによって、見えないけれども確かに存在する「気体」が科学的に理解され、その性質が法則として導かれた。

しかし、実際の気体の振る舞いは、理想気体とは大きく異なり、単純ではなかった。実在気体(real gas)の研究が進み、ファン・デル・ワールスが導いた状態方程式(1873年)は、普遍性が高く、気体と液体を記述し、ガスの液化の道筋を示した。永久ガスは、次々に液化されヘイケ・カメルリング・オネス(1853~1926年、オランダ)がヘリウムの液化に成功して(1908年)、ついに永久ガスがなくなった。

ファンデルワールスの状態方程式は、理想気体からのずれを二つのパラメータ a, b を用いて記述しているが、簡潔な記述であるため、実在気体の振る舞いを、厳密に表現することは難しい。深冷空気分離装置などの低温機器を設計する時には、

少し足りないようである。

オネスは、実在気体の状態方程式を記述するために実在気体の理想気体からのずれを補正する項を導入、ビリアル展開 (virial expansion) を用いた状態方程式を導いた (1901 年)。

$$Z = \frac{PV_m}{RT} = 1 + \frac{B_V}{V_m} + \frac{C_V}{V_m^2} + \frac{D_V}{V_m^3} + \dots$$

または

$$Z = \frac{PV_m}{RT} = 1 + B_P P + C_P P^2 + D_P P^3 + \dots$$

ここで、 Z は圧縮係数(圧縮因子)と呼ばれ、理想気体では1となる。 P は圧力、 V は容積、 T は熱力学温度、添え字の m はモルあたりの量であることを表わしている。係数 B 、 C 、 D 、 \dots は、気体ごとに実験的に求められる定数(温度の関数)であり、第2ビリアル係数、第3ビリアル係数、 \dots と呼ばれる。ビリアル(virial)とは、「力」を意味するラテン語である。係数 B 、 C 、 D 、 \dots の添え字 P あるいは、 V は、式の形から分かるように、圧縮係数を容積で展開した場合と圧力で展開した場合のそれぞれのビリアル係数を表わしている。

状態方程式右辺の第1項は理想気体であり、第2項が二つの分子の間の相互作用、第3項が三つの分子間の相互作用の寄与、というように実在気体を表現している。したがって、第1ビリアル係数というのはなく、ビリアル係数は、第2から始まり、温度の関数となっている。多分子間の相互作用は非常に複雑であり、これを厳密に記述することは困難である。しかし、ファンデルワールスの状態方程式のように、あまりに簡潔すぎると実測値を表現するのに十分ではないということがある。オネスが導入した状態方程式のビリアル展開(ビリアル方程式と呼ぶこともある)では、展開する項の数を増やすことによって、実在気体の状態方程式をより精密に記述することができ、さらにこの手法は浸透圧の表現にも応用ができる。ビリアル係数は、通常、気体の種類ごとに温度の関数として与えられ、実験的に求められている。

ファンデルワールスの状態方程式やオネスのビリアル展開式は、理想気体の状態方程式から出発してこれを補正する形式で実在気体の状態方程式を求めているため、分子間力が働かない非常に低圧の状態では、理想気体を含むことができる。 V 、 P 、 T の値によっては Z が近似的に1となる。

オネスは、超低温の分野では誰もが知っている学者であり、ヘリウムの液化、超伝導現象の発見などの功績によってノーベル物理学賞を受賞している(1913年)。しかし、エンタルピーの概念を導入、ビリアル展開による状態方程式の記述を行

い、熱力学の分野でも非常に大きな功績を残している。超低温分野の技術者でなくても、深冷空気分離に関わっている技術者であればオネス (Heike Kamerlingh Onnes) の名前は覚えておいた方がよさそうである。

物理や化学の成果を工業的に利用する応用技術が現れ、より複雑な混合気体、液体を取り扱うようになり、実用的で数値精度の高い状態方程式が必要となってきた。特に20世紀の中盤に大きく発達した「化学工学」(chemical engineering) と呼ばれる新分野では、様々な種類の気体と液体を大量に取り扱うようになり、より精度が高く実用的な状態方程式が提案されるようになった。M ベネディクト、G.B. ウェブ、L.C. ルピンによる「BWR 方程式」(1940年、高圧気液平衡、8つのパラメータを含む)、O.レドリッチとJ.N.S.クォンの「R-K 方程式」(1949年)、ディンユー・ペンとドナルド・ロビンソンの「ペン=ロビンソン式」(1976年) などがある。高圧の気液平衡を議論する時には、理想気体からのずれが大きくなるため、状態方程式だけでなく、実在流体の化学平衡も正確に記述しなければならない。深冷空気分離装置のような低温の蒸留装置を設計するためには、精度のよい混合物の気液平衡の取り扱い方法が必要である。混合流体の気体と液体の平衡状態を、厳密に表現することは、非常に複雑になることが予想されるので、できる限り実用的であることも必要である。

実在流体の状態方程式の多くが理想気体の式を基本にして、これを補正するような形式で表現しているが、実在流体の化学平衡も、理想気体の化学ポテンシャルの形式が成り立つようにする方法が考えられた。

ジョサイア・ウィラード・ギブズ (1839~1903年、米国) の熱力学平衡に関する概念をもとに、ギルバート・ニュートン・ルイス (1875~1946年、米国) によって、実在気体、実在液体を表わす概念、フガシティー (fugacity、フガシチ) が導入された。フガシティーは、高圧の実在気体の化学平衡を取り扱うためのものであり、深冷空気分離装置は、操作圧力が大気圧から500kPa程度とあまり高圧ではないが、低温で操作されるため、物性としては高圧の気液平衡として取り扱うべきであり、この概念が外せない。

気体が容器に入っている時、その気体の圧力とは「分子が壁に衝突した結果の力」である。そのため、理想気体と実在気体では、同じ圧力を示しても、その圧力の元になっている現象は異なっていることになる(ただし理想気体は、存在しないので理想気体の圧力も仮想のものである)。理想気体の分子は、並進運動エネルギーを持つが、実在気体では、それに加えて分子の回転・振動エネルギー、分子間相互作用エネルギーを含んでいるため、理想気体と実在気体が同じ圧力を示しても、その内容は異なり、同じ自由エネルギー(ギブズの自由エネルギー)を持っていないということになる。

深冷空気分離装置のような蒸留装置において最も重要な物性は気液平衡である。気液平衡状態とは、気相と液相の間で、見かけ上、物質の移動がなく（気相と液相の量が変わらない、組成も変わらない）、温度と圧力が等しい（全体が一樣の温度と圧力）という熱力学的平衡状態である。実際には気相と液相の間で、分子が移動していても、見かけ上、変化がなければそれが平衡の状態である。さらに、気液平衡が成立する時、熱力学的には、気液両相のギブスの自由エネルギーが等しいという平衡の条件が必要となる。しかし、実在気体と実在液体でこれを厳密に表現することは容易ではない。実在気体の化学平衡を理想気体の化学ポテンシャルの形式で成立するようにと考えられたのがフガシティーの概念である。

実在気体と実在液体の間の気液平衡の条件を、気液両相のフガシチが等しいという条件に置き換えることによって、気液平衡の実用的な表現が可能となり、平衡状態における気相と液相の混合物の組成（気液平衡）を求めることができる。

理想気体には、分圧の法則があり、混合ガスに含まれる各成分の圧力を定義できたが、実在気体の場合はフガシチがこれに代わると考えることができる。したがって、非常に圧力が小さく分子間力が小さい混合ガスの極限は、理想気体であり理想気体のフガシチは、分圧に等しいと表現することもできる。

混合物の成分*i*のフガシチ f_i は、次式で定義される。

$$f_i = p^0 \exp\left(\frac{\mu_i - \mu_i^0}{RT}\right)$$

p は圧力、 μ は化学ポテンシャル、添え字の0は基準圧力である。

理想気体のギブスの自由エネルギーを求める式の中に現れる圧力を、別のものに置き換えることによって、実在気体の式が使えるようにと考え出された仮定の圧力がフガシチであり、「理想気体の式の中で使える実在気体の仮定の圧力」、あるいは「実在気体と同じ化学ポテンシャルを持つ理想気体の圧力」という概念を持ち、圧力と同じ次元を持つ。理想気体の分圧と実在気体のフガシチの比をフガシチ係数と呼び、実測データに基づいて与えられる。

空気分離の場合は、主に窒素－アルゴン－酸素の三成分系の実測値を元にした「物性推算パッケージ」（物性推算式）が必要であるが、混合物の状態方程式、圧縮係数を求める計算式、気液平衡を記述するためのフガシチ係数の計算値が、実際のプロセス計算において十分な精度を持つことが重要である。物性推算に許容できない誤差があれば正しい設計・製作ができないので、産業ガスのメーカー、プラント・機器メーカーにとって、具体的な物性推算、混合ガスの組み合わせ、物性データの適用範囲、推算の精度などは、非常に重要な情報、ノウハウである。

2. 2. 1. 7 見えない気体を取り扱う

気体の存在が認識されたのが350年前、理想気体の法則が確立されたのが200年前、实在気体の最初の状態方程式が得られたのが150年前、分子の存在が実証されたのが110年前、全ての気体が液化されたのは、わずか100年前である。

ガス分子は、見えないが、確かに存在し、その存在を疑う人はいない。しかし、ガスの製品は、どれだけの量を集めてもほとんど無色透明である。さらに、通常は、金属製や複合材料製の高圧ガス容器や配管の中に閉じ込められているため、その実体を目にすることはない。また、空気以外のほとんどのガスは、人体に有害であるから、ガスを容器から取り出して五感で感じることもできない。

「ガス臭い」という言葉があるが、空気も酸素も窒素も、都市ガスやLPGもほとんどのガスは無臭である（人間の嗅覚とは化学反応しない）。一般的な可燃性ガスが匂うのは、漏洩を嗅覚で検知しやすいように付臭（ふしゅう）、あるいは着臭しているためで、匂うのは付臭剤あるいは着臭剤によるものである。メタン、エタン、プロパン、ブタンなどの主成分は無臭である。都市ガスが一般家庭で広く使用されるため、漏洩をすぐに知らせるためにこのような方法がとられている。

産業ガスの場合は、通常は、付臭剤を混入しては使い物にならないため無臭であり、漏洩しても嗅覚で検知することはできない（付臭剤が混入しても構わない一部の利用は除く）。半導体材料ガスの中には、有臭のものが多く、そもそも微量の漏洩も許されないガスばかりであり、嗅覚による検知ではなく高感度の検出器と安全設備が整えられているところでのみ使用される。

液化されたガスは、多くの場合、無色透明であり、通常は容器の中にあるので直接見ることはできず、低温であるため触れることもできない。

液体酸素は、わずかに青味がかったが、取扱いに注意を要するので、直接見る機会はかなり限られる。液体酸素は、その他の化学物質や薬品などと同様、専門知識のない者が扱うの危険である。低温液化ガスを紹介する展示でも、液体酸素が使われることはあるが、液体酸素は取扱いに注意が必要であるため、ほとんど使われることはない。液体酸素という言葉もあるが、非常に淡い青色なので、コバルトブルーのような色を想像していた人は少しがっかりするようである。

産業ガスは、工業や医療の素材であるが、鉄鉱石から鉄が生産されたり、鉄が加工されて機械になったり、化成品がプラスチック製品になったりする原材料とは利用の方法がかなり異なる。鉄鉱石、セメント、木材などは原材料がそれなりの重量となって製品に変わるが、ガスは、使った後にどこにも残っていないように感じる素材である。多くは、雰囲気ガスとして消費され、酸化反応や半導体の材料として利用され、他の製品の製造工程において、ガスの機能が利用される。素材ではある

が、原材料ではないため、最終製品に占めるガスの重量は、わずかである。

ガスビジネスでは、触れることができない「もの」を売買しており、ガスを売るということは、中身（組成など）が保証されたガスを売るということであり、ガスを買うということは、製造者を信用してガスの機能を買うということである。

都市ガスやLPGのような燃料ガスも機能を販売しているが、燃焼や冷暖房に直接用いられるため、機能である熱量は直感的に分かりやすい。お湯を沸かしたり、調理したりする熱源は理解しやすく、種類にもよるが、普通は炎を見ることもできるので実感しやすい。これに対して、産業ガスは、提供される機能が熱源ではないため、直感的には分かりにくく、ガスを利用した「結果」も顧客によって様々である。要するに、結果が重要であって、容器や配管の中に本当は何が入っていたのかというのは、実体としてはつかめていないのである。

産業ガスの供給者は、正しい方法でガスを製造し、時にはそれを詳細に分析し、ガスの持つ機能を保証している。分析計などを使って測定した組成が非常に重要であるが、本当に重要なのはガスを利用した結果である。ガス屋は、顧客がガスをどのように利用し、どのような機能・性能を必要としているかを知ることが非常に重要である。

ガスを供給するということは、ガスを利用する「ソリューション」を提供することであるから、昔から伝わっている方法でガスを作って売るというだけでなく、ガスの科学や本質を知り、ガスの利用（ガス・アプリケーション）を熟知し、顧客の技術や科学にも近づかなければならない。

普段は、あまり意識することがない「階層」であるが、ガスの利用範囲、その階層は、非常に広い。ガスの製品・商品・技術を理解するためには、対象はどの階層にあるのかを思い浮かべ、使おうとする理論、手法、道具やその仕組みは正しくその階層に対応しているのか、見えないものを想像する力が必要である。

産業ガスビジネスでは、ガスの同位体（同位体化合物）も取り扱う。同じ元素でありながら異なる核種を持つ原子を同位体と呼び、そのうち安定なもの（安定同位体）を製造・仕入・加工（標識化合物の合成）、供給するのが安定同位体ビジネスである。化学種として同じ元素である同位体の違いは、原子核の重さの違い（質量数の違い）であり、原子核の階層（ 10^{-14}m ）は原子や分子の階層（ 10^{-10}m ）とは4桁も異なる。原子や分子の常識や議論を原子核にそのまま持ち込むことはできない。同位体ビジネスでは、分子と原子核の階層が大きく異なることを忘れないようにすることが重要である。