

### 1. 3. 2 原料空気 (Feed air)

製造に必要なエネルギーをそのコストと規模で考えると、酸素の原料を水とすることはあり得ない。しかし、原料を空気にするということはどういうことなのか、何となく空気は無尽蔵にあると思っているが、はっきりとした数字をみることはあまりない。

最初の酸素会社、プリンズ・オキシジェン社は、空気を原料としたが、その時と現在では産業の規模が大きく異なっている。資源としての空気を数字で考えてみたい。

### 1. 3. 2. 1 大気と空気 (atmosphere and air)

地球という惑星は、人間から見るととてつもなく巨大で、全体を考えるのは非常に難しい。しかし生存圏と呼ばれる領域は、巨大であることには変わりはないが、星の大きさに比べると極わずかであり、手が届きそうであり、少しは考えやすくなっている。生存圏の研究が行われてきた。

生存圏を資源領域と考えると、大きく分けて、気圏、水圏、地圏の3つがあり、英語では、気圏は atmosphere、水圏は hydrosphere、地圏は geosphere と呼ぶ。sphere とは、球面や天球を表わして、北半球や南半球の半球は hemisphere と呼ぶ。

英語のアトモスフェア (atmosphere) は、学術用語では「気圏」であるが、この他にも、大気、空気、雰囲気、ムード、環境など様々な意味を持つ単語であり日常会話にもよく用いられる。

大気圧 (atmospheric pressure) は、圧力の単位としても使用され、atm (気圧、アトム) と書かれる。atm は、非 SI 単位であるが、かつては、1atm が標準状態の定義に用いられ、物性を求める時の圧力の単位に用いられることも多かったため、現在でもよく見かける。(1atm=101.325kPa)。

地球の大気は、高度が上がるにつれて、希薄になり、地球表面から地球と宇宙の境界まで続いている。標準大気圧と呼ぶ気圧は、大気の底、海面における大気の圧力である。大気のあるところまでが地球であり、その先が「地球以外の宇宙」と考えることができ、大気圏の一番上は、地球と宇宙の境界である。しかし、ここまでが気圏 (大気圏)、ここから先が宇宙という線は決めにくく、境界線ははっきりしていない。最も高層の大気、外気圏は、地上

から高度 10,000km まであり、直径 1 万 2700km の地球に対して、地球の大気圏は、直径 2 万 km もある。

大気は、高さ方向に鉛直構造を持っており、地表面からの高さが、大気の層を特徴づけている。下から順に対流圏 (troposphere)、成層圏 (stratosphere)、中間圏 (mesosphere)、熱圏 (thermosphere)、外気圏 (exosphere) の 5 つに区分される。

図 1-3-5 に外気圏を除く 4 つの大気の鉛直構造を示す。

図の右の軸は地表からの高度であり、線形に示されているのに対して、図の左の軸の気圧は対数で示されており、高度と気圧はほぼ指数関係にある。

オゾン層、磁気圏、電離層などの名称も知られるが、これらは、鉛直構造とは異なる地球物理的な区分である。太陽系内の天体は、太陽からの強い宇宙線 (放射線) に曝されるが、地球の地表は、オゾン層や磁気圏によって、

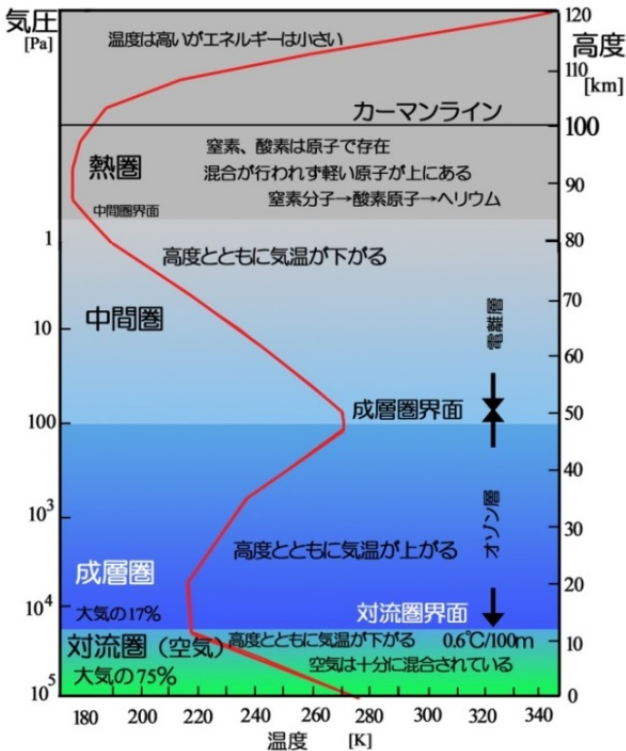


図 1-3-7-外気圏を除く大気の鉛直構造 (温度変化基準)

この危険な太陽光線から守られている。オゾン層は、ほぼ成層圏に重なっている。磁気圏は、太陽側が地球半径の10倍、反対側が200倍ほどであり、大気圏とは大きさが全く異なる別の構造である。電離層は、紫外線やX線によって、気体の分子や原子が電離している領域で、ほぼ中間圏に重なっている。電波を反射する性質が通信に用いられている。

表 1-3-1 地球の大気圏の鉛直構造

温度を基準とする鉛直構造	高度 km	特徴など	その他の鉛直構造	高度 km
外気圏 Exosphere	800~1000	本当は、ここまでが地球の大気圏	磁気圏	1~7万
熱圏 Thermosphere	80~800	気圧が低く、便宜的に宇宙と呼ぶ	電離層 Ionosphere	60~500
中間圏 Mesosphere	50~80	いわゆる「大気圏突入」空力加熱が起こる領域		
成層圏 Stratosphere	9-17~50	高度とともに温度が上昇する	オゾン層 Ozonosphere	10~50
対流圏 Troposphere	0~9-17	空気と呼ぶ。 高度とともに温度が下がる。 大量の水蒸気を含む。 赤道付近で高い。 組成は高度によらず一定で空気分離の原料。		

図の大気の鉛直構造の下から、その特徴をみていくことにする。

大気が一番下の層、対流圏 (troposphere) は、空気 (air) と呼ばれることが多い。その地表からの高度は、緯度や様々な条件によって異なるが、およそ9000m~1万7000mの範囲である。

対流圏の重要な特徴は、空気の組成が一定であり、水蒸気が多く含まれ、高度が上がると気圧と気温が低下するというものである。

対流圏の高度と気圧の関係は、ほぼ比例しており、高度が100m増すごとに、10hPa (1kPa) ずつ気圧が低下する。高度が上がる (標高が高くなる) と太陽には近づくが気温が低下することが、生活実感の中でも常識となっている。

これは、高度が上がると気圧が低下すると、膨張によって空気の温度が下が

るためである。水蒸気を含まない空気として計算すると高度が 100m 増すごとに約  $1^{\circ}\text{C}$  下がるが、対流圏には大量の水蒸気があるため、水蒸気を持つ熱容量と潜熱がバッファとなり、実際の温度変化は、かなり穏やかであり、平均では、高度が 100m 増すごとに  $0.65^{\circ}\text{C}$  ずつ気温が低下する。

対流圏では、上空で気圧が低く温度が低く、地表は気圧が高く温度が高いため、密度の違いによる上下の対流が起こりやすく、全体として非常によく混ざった混合気体となっている。

なお、飛行高度 300~400km にある国際宇宙ステーションは、地球の大気圏内を飛行しており、希薄な大気から大気抵抗を受けて徐々に軌道が低下するため、高度制御が行われている。高度を上げるリブーストには宇宙ステーションが持つエンジンあるいは、ドッキングした宇宙船のエンジンが用いられる。高度が高くと、シャトルなどの補給船が届かない、あるいは積載量が少なくなるなどの理由から最高高度が制限されており、大気圏の外に出ることはできない。

宇宙ステーションのまわりには大気があり、微小重力もあるため、大気圏内、重力圏内にあり、その飛行高度は非常に高いものの、宇宙ステーションはまだ地球の中（大気圏内）にあるということになる。しかし、航空宇宙分野では、地表付近とは環境が大きく異なる高度 100km を便宜的に地球と宇宙の境界（図中のカーマンライン）としており、それよりも高い 400km の高度にある実験室を宇宙ステーションと呼んでいる。

#### 補足 1-8：対流圏の気温の変化

地表面に近い空気は、太陽熱によって暖められ、膨張して密度が低下した空気塊が上昇していく。この時、空気塊とまわりの空気と間の伝熱はあまりよくないので、空気塊は、ほぼ断熱膨張をして、まわりの空気を押し上げる仕事をしながら上昇していくため、内部エネルギーが減少し、空気塊の温度は下がっていく。

この時の空気を、およそ理想気体に近い状態、すなわち分子運動に比べて分子間力が無視できるものと考え、密度と地表面からの高度の関係（静水圧）と理想気体の状態方程式から、高さ方向の温度変化は、次式のように表わされる。

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{gM}{R}$$

$g$ は重力加速度、 $R$ はモル気体定数である。

ここで、空気を分子量  $M=0.029\text{kg/mol}$  の二原子分子の理想気体とすると、比熱比  $\gamma \equiv C_p/C_v = 7/5$  から、 $dT/dz = -9.8\text{K/km}$  となる。

すなわち、断熱膨張して上昇する空気は、1km 上昇すると 9.8K 温度が低下、100m で約 1°C 気温が下がると計算される。これを「乾燥断熱減率」と呼ぶ。

しかし、対流圏には大量の水蒸気が含まれているため、実際の平均の「気温減率 (lapse rate)」は、 $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$  となっている。さらに、水蒸気が飽和になり雲が発生するほどの気象条件になると、「湿潤断熱減率 (moist adiabatic lapse rate)」は、 $0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$  ほどとなる。

水蒸気が液化、固化する時の潜熱の放出は非常に大きく、乾燥している空気では 100m に 1°C ずつ気温が下がるところが、水蒸気を含んでいる場合の気温低下は約半分ほどになっている。対流圏が水蒸気を含まないとなると、標高 2000m では海面付近に対して気温が 20°C も下がるが、飽和であれば、気温の低下は 10°C にとどまる。この違いはかなり大きい。

(参考：竹内淳「高校数学でわかるボルツマンの原理」講談社ブルーバックス)

大気は「地球を覆う気体の層全て」であり、「対流圏 (空気)」はその一部であり、厚さ (高度) は大気圏全体のわずか 4% に過ぎない。しかし、空気の質量は大気の 75% を占めており、しばしば、空気と大気は、混同されたり、区別がされなかったりする。

液体窒素の貯槽などからガスを放出する時は「大気放出」といい、貯槽や機器の内部に空気を入れる時は「空気置換」といい、容器の蓋を開けた状態を「大気開放」という。空気圧といえば、たいていは自転車や自動車のタイヤの内圧のことであり、空気圧は大気圧よりも大きい。空気という気体と大気という環境を使い分けているようにも思えるが、大気と空気がはっきりと区別されていないことも多い。大気の組成は空気の組成ではないので、大気という時には、大気のどの部分を指しているのかが重要である。気象関係では「大気の状態が不安定な気象条件」といった表現がされることがあるが、

この場合の大気とは、およそ対流圏から成層圏下部までの大気の温度分布などを指しているようである。

対流圏の上の成層圏 (stratosphere) は、ほぼオゾン層と重なっており、オゾンが太陽光線の中の紫外線を吸収するため、その反応によって温度が上昇する。対流圏界面 (対流圏の上の境界) は高度 8~17km であり、成層圏界面 (成層圏の上の境界) は高度約 50km であり、この間が成層圏である。

20 世紀初頭、気球による観測によって、対流圏の上には対流圏とは異なる構造の大気があることが発見された (1902 年)。その時、高度上昇に伴って温度が上がるのが分かり、温度が低く重い気体が下に、温度が高く軽い気体が上にあるため、対流がなく大気が混合されていないと考えられ「成層圏」という名前が付けられた。しかし、その後の詳細な観測によって、対流圏ほど活発ではないものの成層圏にも気体の混合があり、風が吹き、組成はほぼ一定であり、完全な成層ではないことが分かった。

成層圏には、大気圏全体の 17% (重量比) の大気があり、対流圏 (空気) と成層圏の質量を合わせると大気全体の 95% を占める。

対流圏界面付近には、ジェット気流 (対流圏上層の強い偏西風の流れ) があり、水蒸気が少なく、気象の変動が少ないため、航空機が航路として利用することも多い。成層圏の中には、偏西風や偏東風などの特徴的な風があり、地表付近の気象にも大きく関わる領域なので、気象分野では、対流圏 (空気) だけでなく高層大気である成層圏も研究対象、観測対象となる。

成層圏の上の中間圏 (mesosphere) になると、オゾン濃度が減少し、再び高度とともに温度が下がり始める。図 1-3-7 に示すように大気圏の中では中間圏の温度が最も低い (-100℃)。大気中の原子や分子が紫外線や X 線によって電離、自由電子密度が大きくなっており、電離層が形成されている。電子密度は、太陽光に影響されるため昼間と夜間では、電離層の状態が異なる。中間圏までは、大気は混合されている。

中間圏の上、高度 80km から 800km までが、熱圏 (thermosphere) となる。高度とともに気温が上昇、太陽からの高エネルギーの粒子や磁気圏の電子によって加熱されるため、2000℃くらいまで温度が上がる。ただし、これは、非常に希薄な大気分子運動としての温度であり、熱容量が非常に小さいため、この付近を飛ぶ人工衛星などがこの温度にさらされて、加熱されるということではない。熱圏にはオーロラが現れる。

中間圏までの大気は混合されているが、熱圏以上の大気は密度が小さいた

め、十分に混合することがなく、重力による分離が起こる。熱圏では、重い窒素分子が下に集まり、その上に酸素原子、その上にヘリウム原子という順序に重なっている。窒素の方が酸素よりも重く、下にあるというのは、不思議な感じがするが、窒素は分子、酸素は原子で存在しているため、このような構造になる。熱圏では、重さの順に大気の構造が作られ、逆に言えば、熱圏以下の大気では、重さによる分布が起こらないため、地上付近にアルゴンや窒素が沈んで溜まるということが起こらない。

また、熱圏の気圧は非常に低いため、隕石が地球に突入する時や、宇宙船や人工衛星が大気圏に再突入する時は、熱圏の大気による摩擦加熱がほとんどない。高速で突入する隕石や宇宙船の機体は非常に高温になるが、これは摩擦熱ではなく、高速の航空機でもみられる「熱の壁」と呼ばれる、断熱圧縮による「空力加熱」によるものである。断熱圧縮加熱は、日常的なガス配管でも起こり得るので、特に酸素ガスを急激に大流量で流すような操作は避ける必要がある。もし配管中に可燃物（ごみや可燃性のパッキンなど）があると断熱圧縮加熱によって発火する可能性もあるので、急激な操作を避けるだけでなく材料の選定や施工管理にも注意が必要である。

人工物の大気圏への再突入は、有人宇宙船の場合は、高温にならないように速度や高度が調整され、回収しない人工衛星の場合は、地上へ到達する前に燃え尽きるように熱圏から中間圏への再突入時に破壊されるように制御されている。隕石などの自然物が大気圏に突入する時は、熱圏付近で燃えて流れ星になることが多い。

JAXAの惑星探査機「はやぶさ」は、小惑星からサンプルリターン用カプセルを地球に持ち帰るため大気圏に再突入したが、その時の速度は毎秒12km、温度は1万°Cにもなり、本体は分解消失したが、カプセルは無事地上で回収された。はやぶさが小惑星イトカワから持ち帰った微粒子の分析には、地球上の物質の影響を極力減らすための工夫がなされており、産業ガスの工場で生産された超高純度の窒素ガスが研究機関に対して供給された。

SF映画では、スリリングな大気圏再突入（atmospheric reentry）が描写されるが、初期の宇宙開発時代の誤った常識や熱圏に対する誤解から科学的誤りが多いようである。たとえば「空気の摩擦熱」で高温になると勘違いされることがあるが、熱圏の気圧が低いため、大気圏（熱圏）再突入時には、大気との摩擦熱は発生しない。温度が上がるのは、中間圏に達した時の断熱圧縮によるものである。

有人機（帰還機）では、耐熱構造だけでなく、最高温度が上がり過ぎない

ような再突入角度、速度制御、姿勢制御も行われている。再突入の角度が浅いと大気に弾かれて宇宙のかなたへ飛んでいってしまうと思われたことがあったが、実際は、そういうことは起こらず、軌道離脱のタイミングのずれ、着地予定地点が大きくずれることによって、地上への帰還プログラムや地上部門の回収作業に問題が生じることになる。また、再突入時に機体が高温となり、通信が完全に途絶するシーンが多いが、有人宇宙船の場合は、機体が高温のプラズマに包まれている時でも、突入方向の後方のアンテナを使って上空にある人工衛星を経由して地上との交信が可能であるため、全ての場合で通信ができないという訳ではない。



## 1. 3. 2. 2 空気の組成

地球の大気は、このように非常に特徴的な鉛直構造を持ち、その構造・組成は、46億年の歴史の中で非常に大きく変わってきた。中間圏以下の大気は、分子が質量で分離することがなく混合気体となっており、最下層の対流圏の大気（空気）は、よく混合され、高度によらず組成が一定である。現在の空気中の窒素と酸素の量は、一様で年間を通じてほぼ一定である。空気は非常に安定した多成分の混合ガスであるが、これは、われわれの生活にとってもわれわれの産業にとっても非常に重要なことである。

空気を原料とする空気分離プロセスでは、空気を、窒素、アルゴン、酸素の3つの主成分とする混合ガスとして取り扱う。化学工学では、拡散や分離を取り扱う時に、複雑さを避けるために2成分系(binary)の問題とすることも多いが、空気の場合、3番目に多いアルゴンの濃度が無視できないほど高いため、3成分系(ternary)とするのが普通である。次の表に代表的な物性を示す。

表 1-3-2 空気の主要成分と標準沸点

成分	空気中の濃度[%]	純物質の物性	
		密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	標準沸点 [K]
窒素	78.08	1.251	77
アルゴン	0.93	1.783	87
酸素	20.95	1.429	90

濃度は体積比、密度は0℃・大気圧の時の値、標準沸点は大気圧での沸騰温度

各成分の密度は、窒素・酸素・アルゴンの順に大きくなるが、空気は十分に混合されているため、空気に含まれる軽い成分である窒素が上に集まったり、重い成分であるアルゴンが地表に集まったりすることがない。

もしも、アルゴン－酸素－窒素が分離していたなら、高度が上がると窒素が濃く、酸素が薄くなり、地表付近ではアルゴンが濃く、酸素が薄くなり、中間部は高濃度酸素とオゾンの層ができることになり、生物が安全に生存できる高度がほとんどないということになる。しかし、最下層の大気は十分に混合された対流圏であり、組成は均一であり、高度が上がると空気は薄くなるが、対流圏と成層圏では、酸素は薄くなることはない。

表 1-3-3 にその他の成分を含む大気の組成（海面高度の空気）を示す。表中の濃度は ISO による 1975 年の「国際標準大気」、二酸化炭素の濃度は、温室効果ガス世界資料センター (WDCGG) の解析による 2013 年の世界の平均濃度である。ISO の資料では、空気ではなく標準大気と書かれているが、「海面高度の値」との注釈があり、この場合の大気とは空気のことである。

非常に組成が安定している空気であるが、いくつかの成分は、発生や循環の機構が異なっているため、場所と時間によって濃度が異なっている。特に水蒸気は、気象条件によって空気中の濃度が大きく変わる（0～4%）。

表 1-3-3 乾燥空気の主な組成  
濃度は「国際標準大気」（海面高度、ISO-1975 年）

	濃度	単位	安定	用途など	工業的製造方法
窒素	78.084	%	安定	化学、半導体	空気分離
酸素	20.948	%	安定	鉄鋼、化学	空気分離
アルゴン	0.934	%	安定	希ガス	空気分離
小計	99.95	%			
二酸化炭素 (WDCGG2013 年)	396	ppm	変動	化学、食品	燃焼ガス、化学工 業の副生
ネオン	18.18	ppm	安定	希ガス	空気分離
ヘリウム	5.24	ppm	安定	希ガス	一部の天然ガス から
メタン	1.81	ppm	変動	燃焼、発電	天然ガス、バイオ ガス
クリプトン	1.14	ppm	安定	希ガス	空気分離
二酸化硫黄	>1	ppm	変動	化学	セメント副生
水素	0.5	ppm	安定	化学	石油精製、鉄鋼、 石炭化学
一酸化二窒素	320	ppb	変動	麻酔用	化学反応
キセノン	87	ppb	安定	希ガス	空気分離

水蒸気は、他の気体と同様に肉眼でみることはできないが、固化や液化によって雲や霧や雨や雪ができたり、結露して滴となったり、湿度や乾燥を体感したりと、その存在を身近に感じることができ、気象、大気・海洋の研究では極めて重要な因子である。しかし、空気中の水蒸気の濃度変化はあまりにも大きく、標準値を定めることができないため、空気を気体として取り扱う時は表のように水蒸気を含まない「乾燥空気」とするのが普通である。

二酸化炭素や硫黄化合物は、生態系、火山活動、人為的発生（経済活動）などいくつかの要因で変動しており、場所と時間によっては、濃度が異なるため、乾燥空気には含まれるが、おおよその値が参考値として示されている。特に、近年は二酸化炭素の増加による温室効果が地球温暖化・気候変動に与える影響が懸念され、人為的な二酸化炭素の排出抑制が世界の大きなテーマになっているが、現在の平均値は約 400ppm である。温暖化の原因のひとつ

とみなされ、何かと悪者扱いされる二酸化炭素であるが、現在は、地球の歴史からみるとその濃度は最も低い時代である。空気中の酸素濃度の増減、何度も繰り返されてきたが、長期的にみた二酸化炭素は減少を続けてきているためである。空気中の二酸化炭素濃度と気温は植物の生育、すなわち食料生産にとって最も重要な要素であり、気候変動と同じように科学的な研究が必要と思われる。

ネオン、ヘリウム、クリプトンなどの希ガスも空気に含まれているが、これは希ガスが化合物を作りにくい元素であるため、地殻中に資源として存在するのではなく、空気主成分の中に微量成分として存在しているためである。ただしアルゴンは希ガスであるにも関わらず空気中に 9340ppm (0.934%) も含まれている。空気には大量のアルゴンが含まれているため、深冷空気分離装置の設計では、非常に重要なファクターとなる（アルゴンの詳細については「第3章 アルゴンとヘリウム」に記す）。

アルゴン以外の空気中の希ガスが、非常に少ないということを考えるために、空気中に 5.2ppm 存在するヘリウムについて計算してみる。

日本国内の酸素の生産量を年間 100 億  $\text{m}^3$  とすると（根拠は前出）、原料の空気はおよそ 500 億  $\text{m}^3$ 、この中に含まれているヘリウムの量は、25 万  $\text{m}^3$  である。日本のヘリウムの年間消費量は、およそ 1500 万  $\text{m}^3$  であるから酸素製造時の空気からヘリウムを全量回収できたとしても、消費量の 6 日分にしかならない。一方、経済産業省のレポートによる天然ガス中のヘリウム可採埋蔵量は 75 億  $\text{m}^3$ 、ベース埋蔵量は 490 億  $\text{m}^3$  である。2012 年の世界のヘリウムの年間生産量は、およそ 1 億 7 千万  $\text{m}^3$  であるから、可採埋蔵量は 44 年分、ベース埋蔵量は 290 年分ということになる。天然ガスから採取されるヘリウムの濃度、埋蔵量、生産量、コストと比較すると、空気中のヘリウムは資源とならず、実際にヘリウムを回収する深冷空気分離装置は存在しない。（ヘリウムの詳細は第 4 章に記す）

ネオンは空気中に 18ppm 存在し、空気以外に資源がないため空気を分離する時に製造することが可能である。ただし需要が少ないため、ほとんどの深冷空気分離装置がネオン回収装置を持っていない。ネオンの利用方法としてよく知られるのが「ネオンサイン」（ネオン広告塔）である。ネオンガスを微量封入した管に放電すると明るい橙赤色の発光が得られ、エア・リキード社を創設したジョルジュ・クロードがネオン照明器具を発明（1910 年）、事業化に成功し、ネオンサインが広く知られるようになった。最近では、大陽日

酸（株）が、ネオンを冷媒とする高温超電導機器用冷凍機を開発している。

クリプトンは空気中に 1ppm、キセノンは 87ppb と極めて微量にしか含まれていないが、空気以外に資源がみつからないため、空気分離装置によって製造されている。このふたつの希ガスは、深冷空気分離装置内の液体酸素中に溶けているので、これを集めて濃縮することができるが、原料中に少なく、大量の液体酸素を処理しなければならないため、全ての深冷空気分離装置で製造されている訳ではない。

ラドンは、ウランやトリウムなどを親物質として天然に存在する希ガスである。親物質は、花崗岩や土壌中の鉱物中に普遍的に存在し、生成されるラドンが空気中に放出されるので、地球上のいたるところにラドンが存在するが、最も寿命が長い核種でも半減期が 3.8 日と短く、空気の成分としては示されない。ラドンは希ガスであるが、安定同位体が存在しないため、産業ガスの取扱商品とはなっていない。

地下水中のラドン濃度測定が、地下構造の解明や地震研究などに利用されており、欧州や日本にはラドン温泉があるため、ラドンという元素は、比較的名前がよく知られている。近年、ラドンによる健康への影響調査が進んできたため、国際保健機関（WHO）もラドン被曝（主に吸引による内部被曝）を防ぐためのラドンハンドブックを発行するようになった。ラドン被曝は、屋外よりも屋内での影響が大きいとされ、米国、英国、スイスなどでは住宅の売買に際して室内のラドン測定値が考慮されることになっている。米環境庁（EPA）では一般消費者向けのラドン低減ガイドラインを出してラドン被曝を低減するための施策を公開しており、ラドン被曝低減のためのアドバイザーもおかれている。低濃度、低線量であってもラドンの吸引は有害であるのでできるだけ避けるべきであるというのが、欧米の主流である。

日本でも、ラドン被曝の研究はされているが、欧米とは地質や建築物の環境が異なることもあって、あまり高い関心がもたれていない。屋内ラドン基準などは制定されていない。

## 1. 3. 2. 3 空気の主要3成分

空気の中から酸素を発見したのは、英国のプリーストリー牧師といわれ、1775年に論文を提出している。人類は、空気の中に物を燃やす何かがあることは分かっていたが、酸素というものが科学として取り扱われるようになったのは、わずか240年前のことである。その後、アントワーヌ・ラヴォアジエ（フランス）は、空気がいくつかの物質からできていることを見出し、物を燃やす力のある物質をオキシジェン（フランス語 Oxygène、英語では oxygen）と命名した（1779年）。

語源は、酸味からきており、ラヴォアジエの酸性のもとが酸素であるという誤解によってこの名前が与えられた。その後、デービーの研究によって、酸性の原因は、酸素ではなく水素であるということが判明したが、名前は修正されなかった。

日本語には、この物質を表す言葉がなく、ドイツ語の Sauerstoff（酸っぱい・物質）が直訳されて「酸・素」になった。世界の言語の中で、酸素は、酸の素だと勘違いされたままの名前で呼ばれ続けており、今後も訂正されることはない。液体酸素を運搬するタンクローリーや貯槽には、「液化酸素」と表示されているが、産業ガス業界では、液体酸素を「液酸」と省略して呼ぶことが多い。これは塩酸や硝酸の水溶液のことではなく、液体酸素のことである。液酸ローリー、液酸ポンプ、液酸タンクなど、非常に紛らわしいと思うが、産業ガス業界では日常的に使っている。

「窒素」は英語の nitrogen（語源は有毒空気）ではなく、ドイツ語の Stickstoff（窒息・物質）の直訳から「窒・素」になった。酸素を含まない空気は呼吸できないことが古くから知られているが、窒素という気体は、生物学者のダニエル・ラザフォード（スコットランド）が発見したとされている（1872年）。

液酸（えきさん、液体空気）、液窒（えきちつ、液体窒素）、液空（えきくう、液体空気）、原空（げんくう、原料空気あるいは原料空気圧縮機）など、業界だけで通じる用語がある。法律用語は液体酸素ではなく液化酸素と呼ぶので、これも要注意である。

アルゴンは、19世紀末に発見された。空気中に1%近くも含まれているのに、関わらずわずか120年前までは、存在が知られていなかった元素である。詳細は「第2章ガスの物理」と「第3章 アルゴンとヘリウム」に示す。

## 1. 3. 2. 4 酸素の資源と空気の量

フランク・クラーク（1847～1931年、米国）は、人類にとって手が届きそうな3つの領域、気圏、水圏、岩石圏（または地圏）の構成元素を調査し、地球の資源量、元素の量を推定した（1924年）。

クラークは、大学で物理と化学の教授を務めた後、設立されたばかりの米国地質調査所（USGS）の化学部長となり41年間、地球化学の研究に従事した。当時は周期表のほとんどの元素が発見されるようになり、多くの科学者が天然の元素の存在割合に興味を示すようになったが、クラークが77歳の時にまとめた「地球化学資料」の中に示した元素の存在比の数値は、ソ連の地球化学者から「クラーク数（Clarke number）」と呼ばれるようになった。

気圏は、空気を含む大気圏、水圏は海洋や湖水、河川であるが、岩石圏は海面下10マイル（16km）とされた。地球物理の岩石圏（厚さは数10km～数100km）に対してクラーク数の岩石圏はかなり小さいが、クラークは、この領域が人類がアクセス可能な限界であると考えた。クラーク数は地球の組成ではなく、（可能性として）人の手が届く地球表面の組成の推定値ということになる。クラークが、元素の量を推定してから100年近くたって、海洋資源や地下資源の探索は進んだが、人類はそのクラークが提唱した領域には、全く到達していないから、クラーク数の領域は、今でも全ての資源といえる。

図1-3-8にクラーク数の気圏、水圏、岩石圏の概略の大きさを示す。地球の赤道半径からすると、気圏は10%近くあるが、水圏と岩石圏は非常に薄い。

なお、現在では、クラーク数は、一学説に過ぎず、その精度や推定方法についても疑問符がつくようになり、別の統計が必要という指摘もあるが、過去は教育用の資料に広く用いられ、現在でも主要な元素については、数値の修正はわずかであるという意見もある。ここでは、主要元素である「酸素」がどこにあるのかを考えるために、最もポピュラーな資源量であるクラーク数を利用することにする。

図1-3-9に3つの領域の構成割合を示す。クラーク数は、元素の重量比で表

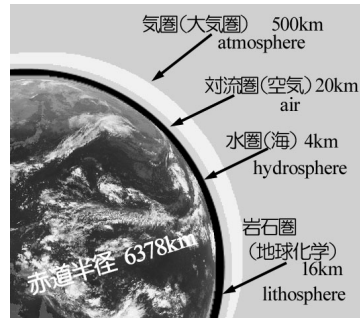


図 1-3-8-クラーク数の気圏、水圏、岩石圏（地圏）の大きさ

され、全領域の93%が岩石圏であり、そのうち95%が火成岩（マグマが地上あるいは地下で冷えて固まったもの）、4%が頁岩（けつがん、シェール、堆積岩の1種）、0.75%が砂岩、0.25%が石灰岩（炭酸カルシウムを含む堆積岩）である。

水圏は、地球表面の70%の面積を占め、全領域の6.9%を占める。水圏の97.5%は海水であり、海中には塩化ナトリウムや塩化マグネシウムを始め、金やウランのような鉱物が大量に溶存している。

ここで、水圏の体積が分かっているので（ $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3 = 1.4 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ）、水圏の質量を約  $1.43 \times 10^{18}$  トンと見積もると、3つの領域の総量は約  $21 \times 10^{18}$  トンとなる。

日常使う数値に比べてかなり大きいため、以下、 $10^{18}$  トンを1エクサトンと呼び、同じ単位にそろえて値を比較することにする。

図1-3-8にクラーク数の上位10元素の割合を示す。

水素は9位であるが、地下資源の燃料である炭素（0.08%、14位）や空気の主成分である窒素（0.03%、16位）は10位以内にも入っておらず、圧倒的に多いのが酸素である。酸素に続いて、ケイ素、アルミニウム、鉄などが多く、金属元素が多い。

現在の地球表面は、これらの元素の酸化物などの化合物で覆われている。岩石圏の酸素は、化合物の中にあり、酸素単独で存在することはないから、鉱脈があって穴を掘れば酸素が噴き出すというところはない。

水の中の酸素（水中に溶存している空気の中の酸素分子ではなく、水分子を構成している酸素原子）は、水圏を真水として重量比、 $\text{O}/\text{H}_2\text{O} = 16/18 = 0.89$  とラフに計算すると、1.3エクサトンとなる。

気圏は、岩石圏や水圏に比べ非常に厚いが、密度が小さいため、質量は全体の、0.03%に過ぎない。エネルギー資源を考えると、気圏の風力エネルギー

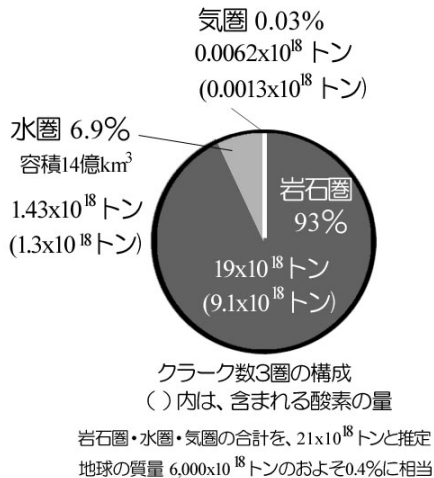


図1-3-7-クラーク数の構成  
(ウィキペディア日本語版を参考に作成)

一も非常に大きい、物質資源に限って言えば、大半が岩石圏の地下資源と水圏の海洋（海水・海底）資源であって、気圏の質量は無視できるほど小さい。

しかも、多種多様な資源が含まれる地圏や水圏に比べると、気圏は、空気以外のものがほとんど何も含まれていないので、気圏をエネルギー以外の資源として考えることはほとんどない。

気圏の質量は 0.0062 エクサトンと計算される。

クラーク数が示す資源量は、日常取り扱う数値に比べて桁外れであり、そもそも鉱物の研究が基礎になっているので、計算が少々不安になってくる。そこで、別の方法で空気の質量を求めてみることにする。

海面付近の大気圧、101.3kPa は、大気の質量に地球の重力

加速度を掛けたものを地球の表面積 ( $5.1 \times 10^8 \text{km}^2$ ) で割ったものであるから、これから大気の質量を求めることができ、0.0053 エクサトンとなる。これは、クラーク数の気圏の質量 0.0062 エクサトンに近い。以下、気圏の質量もクラーク数の値を使うことにする。

大気の質量の 95%が、対流圏の空気と成層圏の大気であるから、全て空気と同じ濃度の酸素があるとして（重量比 23%）、気圏の酸素の量は 0.0013 エクサトンと計算される。（図 1-3-2-3）

クラーク数領域全体の質量 21 エクサトンの 49.5%が酸素の量 10.4 エクサトンであるから、これから水圏と気圏の酸素の量を差し引くと、岩石圏の酸素は、9.1 エクサトンとなる。

いくつもの仮定をおいたかなりラフな概算であるが、酸素の資源量を推定すると、

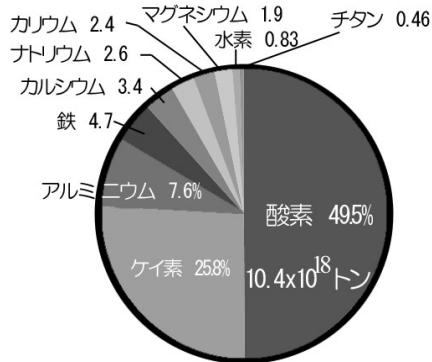


図 1-3-8-クラーク数 (Clarke number) の上位 10 元素、数値は重量%



岩石圏：9.1 エクサトン、  
 水 圏：1.3 エクサトン、  
 気 圏：0.0013 エクサトン

となる。

数値の精度よりも、この数値の桁と相対値が重要である。

酸素の90%が岩石圏にあり、水も空気もない惑星や衛星で酸素を作ろうと思えば鉱物（酸化物）を分解して酸素を取り出すしかないが、これは技術的に相当に難しい。

幸いなことに、地球は水の惑星であり、表面は大量の水に覆われており、水圏には莫大な量の酸素と水素がある。岩石圏から酸素を取り出すことは考えない方がよい。岩石圏より少ないが、水圏には気圏の1000倍もの酸素がある。

しかし、水を電気分解するのは、非常に大きなエネルギーが必要であることは分かったので、やはり気圏である空気を原料にすることを考える。空気の中の酸素は化合物ではなく、空気という混合物を構成する酸素の分子として存在している。

しかし、こんなに少ない「空気」を原料にして産業が成り立つのだろうか。しかも、空気は生物が必要とする重要な気体であり、産業用の資源にするのはいかになものか、という素朴な疑問も沸く。

空気の量は十分にあるということが教科書には書いていないので、空気中の酸素の全量を見積もり、産業用に必要とされる酸素の量と比較することにする。

空気に含まれる酸素の量は、0.0013 エクサトンと計算された。単位を変えると、1.3 ペタトン、1,300 テラトンとなる。

日本の酸素生産量を年間100億Nm<sup>3</sup>とすると、その重量は、143億kg=0.143億トン=14.3メガトンとなる。世界の産業規模を日本の5倍と考えると、70メガトン酸素/(年・世界)となる。推定がかなり大雑把であるが、ここは、桁を評価するための数値である。

テラとメガは6桁異なるから、空気中の酸素の量は、産業ガスである酸素の年間生産量の $1300/70 \times 10^6 = \text{約} 2 \text{千万倍}$ ということになる。

これは、仮に、生産された酸素の全てが消費され、空気には戻らないとした場合、毎年2千万分の1ずつ酸素が減るという計算になる。窒素の生産量もほぼ等しいと考えると、窒素は毎年8千万分の1ずつ減るということになり、空気の量がわずかに減少し、酸素濃度がわずかに減少することになる。

この数字をどうみるか、これを、現在の空気中の酸素濃度の変化と比較することにする。現在は、ほとんど変化しないとされる空気中の酸素濃度であるが、国立環境研究所の報告によると、気候や植物の光合成などの様々な要因によって、トータルでは、年平均で、毎年 4ppm 程度の酸素濃度の減少が観測されている。光合成と呼吸では 1.1 倍、燃焼では 1.4 倍の酸素が交換されるので、酸素濃度の変化が二酸化炭素の変化の予測に利用できないかという目的からこの観測が実施されたという。

夏と冬の酸素濃度の変化が大きい、平均をとると徐々に低下していることがグラフより分かる。ここ

で 4ppm という値は、空気中の酸素濃度の変化であるから、酸素濃度 21% に対しては、5 万分の 1 である。もし過去 15 間の観測されたペースがずっと続くと、5 万年で空気中の酸素がなくなるという計算になる。一方、同じ環境研究所の報告では、地下資源として存在する化石燃料を全て空気中の酸素で燃やしても空気中の酸素の 0.5% しか消費されないという計算もあり、酸素濃度の低下がこ

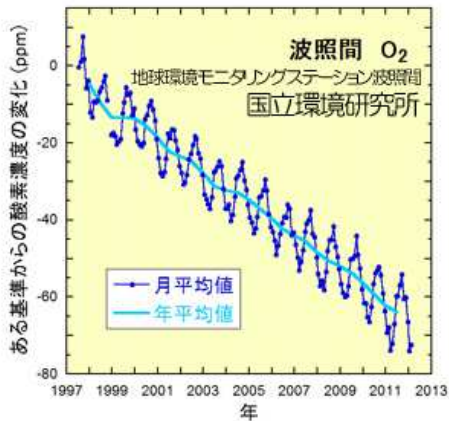


図 1-3-11-国立環境研究所による  
酸素濃度モニタリング

のままの速度で進むとは考えられてはいない。現時点では、酸素濃度の低下よりも二酸化炭素の増加の方が環境への影響が大きく、空気中の酸素濃度の変化は、環境には影響を与えていないと評価されている。

現在の自然界の酸素濃度の変動、年間 5 万分の 1 が何の問題もないというのであれば、最大限に見積もった産業ガスとしての酸素の製造の影響、年間 2 千万分の 1 は、全く問題がないということになる。

空気中の酸素の資源量は、人間の経済活動からみると莫大であり無尽蔵である。

### 1. 3. 2. 5 空気の組成はどこでも同じ

空気分離の特徴のひとつに、原料がいつでもどこでも同じであるということがある。対流圏 (= 空気) では、どこでも組成が等しい。

「高地では、酸素が薄い」という表現を聞くことがあるが、実際は低地でも高地でも空気は同じである。正しくは「空気が薄い(気圧が低い)」なのであって、酸素が薄い(酸素の濃度が低い)と言うことはない。

空気が高度によって組成が変わらないことを発見したのは、シャルルの法則を定式化して発表、気体反応の法則でも知られるジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサック(1778～1850年、フランス)と地理学の古典「コスモス」を著したことで知られる近代地理学の祖アレクサンダー・フォン・フンボルト(1769～1859年、プロイセン王国)の二人である。

ゲイ＝リュサックは、物理学者ジャン＝バティスト・ピオ(1774年～1862年、フランス)と熱気球に乗って上空の大気圧を調査(1804年)、続いて、冒険家フンボルトと、高度が異なる空気を採取して、その組成が変わらないことを発見した(1805年)。化学者ゲイ＝リュサック、物理学者ピオ、地理学者フンボルトの3人の冒険家の探求によって、地球の空気は上空にいくと気圧が下がり、その組成が変わらないということが確かめられたのは、今から210年前のことである。

「濃い」「薄い」という尺度は、濃度を意味するので、酸素が薄い(酸素の濃度が低い)という表現は不正確であり、空気が希薄ということを正しく表現するならば、空気の密度が低い、あるいは気圧が低いというべきである。ゲイ＝リュサックらが発見したように、高度が高くなっても酸素は薄くならない。したがって、高地仕様の深冷空気分離装置では、原料空気圧縮機の吸入圧力が低く、圧縮動力がより多く必要になるため、条件としては不利であるが、空気の組成は変わらないので、基本的には低地仕様と同じ装置である。ただし、高地にはあまり大きな工業都市がないため、大半の装置が低地仕様である。

空気が薄い高地にも人が住んでおり、南米ボリビアの実質上の首都ラパスには、標高3600m～4000mのところ、90万人もの人が住んでいる。低地で生活している人がいきなりそこに移動すれば高山病になるような高地にも多くの人が生活している。人間や様々な生物は、「空気の薄い」高地に適應できる。

しかし、酸素欠乏空気(酸欠空気)と呼ばれる「酸素の薄い空気」に、人

間は適応できない。「空気が薄い」と「酸素が薄い」ことは、「濃度」、「組成」、「濃い／薄い」といった用語の誤用というだけでなく、人体にとっては意味が異なる（危険度が異なる）ので、重要な問題であるが、報道番組では頻繁に「酸素の薄い高地」が出てくる。

似たような間違いとして多いのが、「救助隊が酸素ポンペを背負っている」というのがある。普通の救助隊は、「酸素ポンペ（シリンダー）」ではなく空気呼吸器用のシリンダーを背負っているだが、医療用の酸素ポンペと勘違いしているようである。空気が極めて薄い高山に登るのであれば酸素ポンペも有効である（空気ポンペよりも酸素ポンペの方が荷物を少なくできる）が、火災現場では周囲の空気を利用することはできないので、酸素ポンペではなく空気ポンペが必要である。人の生活にとって空気も酸素も非常に重要なものであるが、空気と酸素は全く別のものである。確認すればすぐに分かると思うが、なぜか、空気と酸素が混同されることが多い。このような科学的に間違った報道が繰り返されると国民の科学リテラシーを低下させてしまう。

空気や酸素を取り扱う産業ガス事業に関わる者は、空気と酸素をきちんと区別し、その違いや酸素欠乏空気の危険性について正しい知識を持つ必要がある。

空気の密度は一定ではなく、高度が上がると小さくなっていく。大気は地球の重力によって表面に存在する気体であり、その最下層が空気であるから、高度が上がると次第にその量が少なくなっていく。気圧は、高度だけでなく、緯度、気象条件によって大きく変わるため、一般的に大気圧と呼ばれているのは、国際度量衡総会（CGPM）が採用する「標準気圧」である。これは海面付近（標高がゼロ）の値から 101.325 kPa（1013.2hPa）と決められている。なお、気象では、気圧を「高気圧」や「低気圧」と表現するが、これは、この標準気圧より高いか低いかという意味ではなく、周囲と比較して相対的に圧力が異なる「領域」のことを示している。したがって標準気圧よりも気圧の高い低気圧も存在する。

対流圏内であれば、100m 増すごとに 1kPa（10hPa）ずつ高度に比例して気圧が低下する。標準気圧から高地の気圧を求めると、富士山頂では、約 70kPa（700hPa）、エベレスト山頂で約 30kPa（300hPa）となる。高い山に登っても空気の組成は一定であり、酸素濃度も等しいので、酸素が薄くなることはないが、空気の密度が小さくなる（空気が希薄になる）ため、含まれる酸素の量（分圧）も小さくなり、体に取り込める酸素の量が不足する。

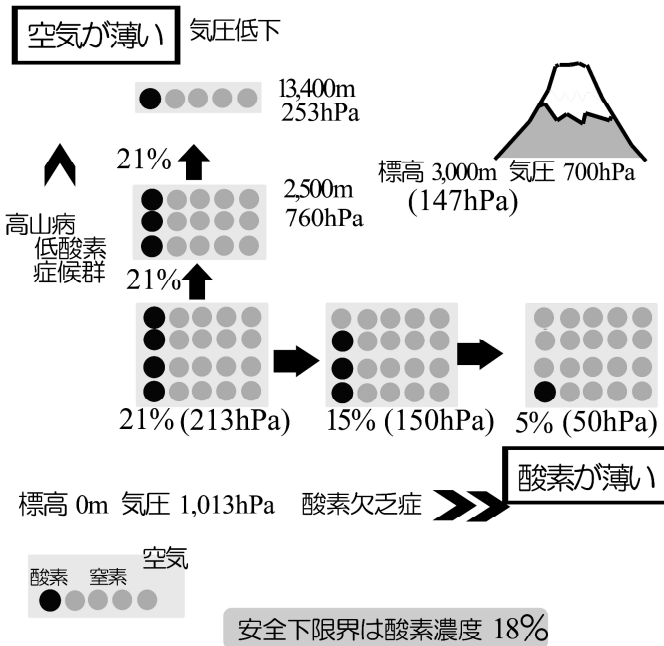


図 1-3-12-「空気が薄い状態」と「酸소가薄い状態」の違い

人間の体は、「高度順応性」によって、ある程度の高さまでは、急激な変化でなければ対応できるが、標高約 2400m (約 77kPa) 以上の高度からは、低酸素状態による高山病 (altitude sickness) を発症するリスクが大きくなる。高山病は、病気ではなく症候群なので日本語では「高度障害」と呼ぶのが正しいが、様々な意味があり分かりにくいので、ここでは一般的な名称「高山病」を使うことにする。

一方、閉鎖空間やガスの噴出などによって、酸소가薄い「酸素欠乏空気」という危険な空気が発生することがある。鉱工業を始め、農林水産、運輸などあらゆる産業において酸素欠乏空気の可能性があるため、「労働安全衛生法」に基づいて定められている「酸素欠乏症等防止規則」では、低酸素濃度の作業環境で労働を行ってはならないとしている。あらゆる産業において、酸素欠乏事故を防止しなければならないが、産業ガスを取り扱う現場でも酸素欠乏空気に対する注意が必要である。

「空気が薄い状態」と「酸素が薄い状態」の違いを考えてみたい。図 1-3-10 に「空気が薄い」高地の状態と「酸素が薄い」酸素欠乏空気の状態を模式的に示す。

図の四角形の大きさが空気の量（気圧）、黒丸が酸素の量を表している。図は、数値をかなり簡略化しており、標準の空気は、窒素 8 対酸素 2 とし、アルゴンは省略している。図の左下が海面付近の標準大気圧の空気であり、図の上に行くにしたがって高度が上がリ、気圧が低下する。空気が薄くなる（密度が低下する）ので四角形は小さくなっている。高度が上がっても酸素は薄くならない（空気に含まれる酸素の割合は変わらない）が、酸素の絶対量（図の黒丸の数）が減る。高度が高くなればなるほど酸素の絶対量が少なくなるので、高山病発症のリスクが増す。

ヒトが環境の異なる状態に置かれる時、体には環境に適応する機能があり、気温変化に対する暑熱順化、寒冷順化などがよく知られているが、気圧低下に対しても、徐々に高度を上げ、高地に長期滞在すれば個人差はあるものの、「高度順化」を獲得して、高山病の発症を防ぐことができる。吸気に十分な酸素が含まれていなかった場合、赤血球数の増加、ヘモグロビン量の増大、肺活量の増大などの順応機能によって、ある程度の低酸素状態に耐えられるようになる。低地に住む人でもこのような手順によって、高地を旅行することが可能になる。

一方、図の右の方へは、酸素が薄くなる様子を示している。気圧は変わらないが、何らかの理由で酸素が欠乏した空気となっている。高地の場合と酸素の量（図の黒丸の数）が同じでも、空気の圧力は低地の大気圧のままであるから酸素の濃度は下がっており、酸素欠乏空気による酸素欠乏症の危険が高まる。

酸素欠乏症等防止規則（厚生労働省令第一七五号、通称酸欠則）は、酸素欠乏症等を防止するための事業者の責務を定めており、酸欠のおそれがあるところでは、労働災害を防ぐために作業主任者をおかなければならないとしている。中央労働災害防止協会発行の「新酸素欠乏危険作業主任者テキスト」に酸欠とその防止策が、詳しく、分かりやすく解説されている。

人間の肺の中では、血液中の二酸化炭素を放出し空気中の酸素を吸収するガス交換が行われているが、全身をまわってきた血液にも酸素が含まれているから、取り入れた空気の中にはその血液中の酸素よりも十分に高い分圧の酸素が含まれていなければガス交換は行われない。

テキストには、各ガスの分圧（酸素、窒素、二酸化炭素、水蒸気）が吸気、

呼気、血液、肺胞の中でどのように変化していくのか、その様子が詳細に示されている（アルゴンについては記載されていないので、おそらく窒素に含まれているものと推測される）。この中で、非常に重要な反応は、血液が肺を通過する 0.75 秒の間に、胚胞において、血液中の酸素が 40mmHg (5.33kPa) から、ほぼ飽和状態の 95mmHg (12.7kPa) になる反応であるとされている。通常の空気を呼吸した場合は、吸気中の酸素は 159mmHg (21.2kPa)、呼気中の酸素は 116mmHg (15.5kPa) である。

もし、吸気中の酸素が不足し、ガス交換が行われないと、酸素欠乏状態の血液が全身に送り出されてしまうことになり、危険な酸素欠乏症が起こる。表 1-3-3 に酸素濃度と酸素欠乏症の関係を簡単に示す。

法令では、酸素濃度 18%を安全下限界とし、これよりも酸素濃度が低いことが予想される場合は、酸素濃度の測定、防護具の準備などを行わなければならないと定めている。今まで、幾度も「高地では酸素が薄い」という報道を聞いたが、最も疑問を感じたのは「2000mの高地では、酸素濃度が4分の3しかない」という説明である。「薄い」というのは、感覚に頼った印象を述べたものとも受け取れるが、「濃度」となると話は別で、4分の3の濃度ということは酸素濃度が 15.8%ということである。このような場所では、表 1-3-4 から分かるように、高地トレーニングどころか、普通に生活することもできない。「濃い」、「薄い」という言葉の使い方には問題があるだけでなく、「分圧」、「濃度」までもがまぜこぜになって、「濃度」という科学の用語が間違っ  
て使われている。（気体については、濃度ではなく分率を使うのが正確であるが、ここでは一般に使用される「酸素濃度」という表現を用いた）

標準大気圧の空気の場合、濃度 18%の酸素の分圧は、標高約 1600m（気圧 85.7kPa）の空気中の酸素分圧に相当する。標高 2400m 以上で高山病発症の危険があるといわれるので、標高約 1600m と分圧が等しい低地の酸素濃度 18%は、まだ大丈夫、と計算する人がいるかも知れないが、表に示すように、これは既に安全下限界である。もし食品の保存のために高地と同じ分圧の低酸素の倉庫を作ったとしても、その「濃度」が表に示すような酸欠のレベルにあれば、立ち入ることはできないということである。法令は濃度で規定しており、分圧による判断は示していない。

テキストによると、一般的に、酸素濃度が低下すると、16%くらいから自覚症状があり、低濃度ほど重症となり、10%以下では命の危険が生じ、特に6%以下の低酸素空気や無酸素空気の場合は、たった、1回の呼吸でも生命の

危険がある。

脳は、体重の2%であるが酸素消費の25%を占め、筋肉のように酸素を貯蔵する能力がないため、無酸素空気の吸入の影響を非常に大きく受ける。脳の活動には血液中に60mmHg(8kPa)の酸素が必要であるが、低酸素あるいは無酸素空気を呼吸すると、ガス交換が停止し、

脳が活動停止に陥る。この反応は酸素欠乏空気の吸入後、わずか2秒以内に起こるといわれる。水中で、少し長い時間呼吸を止めることはできるが、無酸素空気を呼吸した場合は、たったひと呼吸でも危ないとされるのは、低酸素血液が脳に達してしまうためである。

表 1-3-4 酸素濃度と酸素欠乏症の症状との関係

段階	酸素濃度 %	酸素欠乏空気を呼吸した場合の主な症状等
	21	正常
	18	安全下限界。連続換気が必要。酸素濃度測定、呼吸保護具の準備が必要
1	16~12	脈拍・呼吸数増加、集中力低下、筋力低下、めまい
2	14~9	意識もうろう、酩酊
3	10~6	幻覚、意識喪失、昏睡
4	6以下	瞬時に昏倒、呼吸停止、死亡

図 1-3-11 にヒトの肺におけるガス交換の様子を示す。テキストには、アルゴン濃度の記載がないので推定した。

通常のを呼吸した場合、吸気には21.2kPaの酸素が含まれており、胚胞の中の空気は出入りするため、胚胞中の酸素は18.7kPaになっている。全身を回ってきた血液、すなわち肺動脈からの血流の酸素はゼロになっている訳ではなく5.7kPaの酸素が含まれており、胚胞中の酸素の圧力(分圧)とこの血液中の酸素の圧力(分圧)との違いが重要なドライビングフォースとなってガス交換が行われる。

血液中の酸素は12.7kPaまで回復、肺静脈から心臓を通して全身に送られる。消費され5.7kPaで戻ってくる。胚胞から排出される呼気には、15.5kPaの酸素が含まれている。吸気中の二酸化炭素は0.03kPaであるが、呼気中の二酸化炭素は4.3kPa。胚胞では、酸素の取り入れと二酸化炭素の放出というガス交換が行われている。



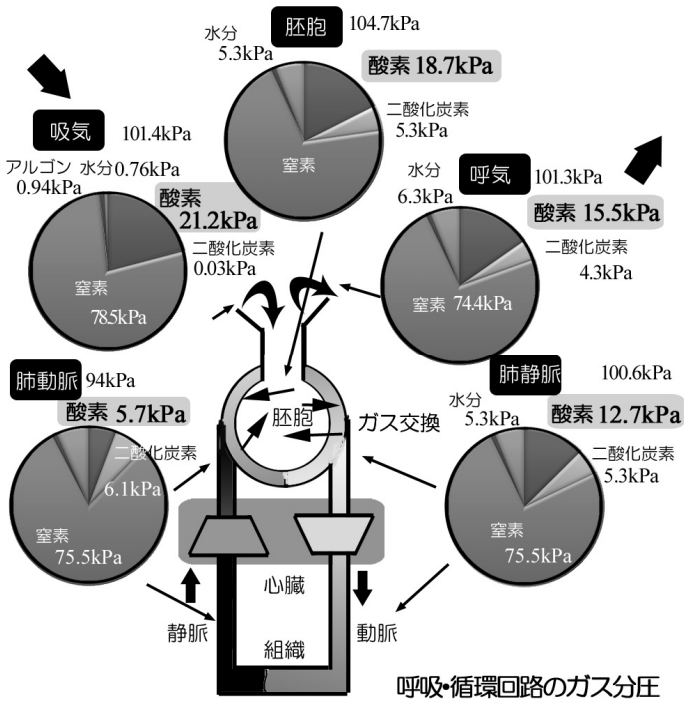


図 1-3-13-ヒトの肺におけるガス交換  
 参考：「新酸素欠乏危険作業主任者テキスト」を参考に圧力を SI に変換  
 ただしアルゴン濃度は記載がないため推定した

非常に精密な呼吸が行われているため、呼気中の酸素が不足し、ガス交換が行われなくなると非常に重大な障害が発生する。もし、呼気中に全く酸素が含まれていなければ、胎胞中の酸素濃度が急激に低下、血液中の酸素も低下したまま全身に送り出されることになる。酸素欠乏空気の呼吸による事故は、一瞬で起こる。

何らかの理由で、酸素が足りない酸素欠乏空気が発生することがあり、その危険はいたるところに存在する。たとえば、マンホールや倉庫、洞窟など閉ざされた空間は酸欠空気が発生しやすく、このような場所に立ち入るときは、事前の酸素濃度の確認が必要である。

発生直後のガスも注意が必要である。液体窒素が蒸発した直後の窒素ガスは、まだ空気とよく混ざっていない低温のガスであり、重く低いところに溜

まり、局所的に酸欠空気を作ることがある。窒素は空気中に79%もあり毒性もないが、酸欠空気の原因になることも多く、取扱いに注意が必要である。エレベータや換気がよくない実験室などが特に要注意の場所である。

アルゴンやヘリウムのような希ガスもそれ自体に毒性はないが、狭い空間で噴出させると酸欠空気を発生させるおそれがある。

酸欠則は、危険場所を「酸素欠乏危険場所及び硫化水素発生危険場所等」としている。これは、酸素濃度の低下と同様に硫化水素の発生にも注意すべきであることを示しており、酸欠則そのものが「酸欠防止、硫化水素中毒防止」の規則となっている。硫化水素は中毒性のある毒性ガスであり、腐敗物などから発生しやすいが、火山国である日本では、温泉や地層など発生しやすい場所が多い。

酸素欠乏の危険性は、産業ガスの分野だけでなく、鉱工業、農林水産業、運輸業、観光業、商業など全ての産業において存在する。テキストには、酸素欠乏が起こる原因や起こりやすい場所、対応の方法などについて非常に詳しく説明されており、事故・災害を防ぐために、一読を薦める。

なお、ヒトや哺乳類のような肺呼吸の機構は、吸気と呼気が同じ通路を用いて行われ、行き止まりになっている胚胞内でガス交換が行われるため、時間によって酸素濃度と二酸化炭素濃度が大きく異なり効率的とは言えない。鳥類は「気嚢システム」という呼吸器官を持ち、陸上生物よりもはるかに効率のよい呼吸が可能である。肺と前気嚢と後気嚢が組み合わされ、吸気と排気が効率よく行われ、肺は常に新鮮な空気で満たされる。鳥は人が行けないような高度、1万mの高さを飛んで山脈を越え、飛行機と同じ高さを飛行することもできる。

しかし、地球上の生物の進化は、その時の空気中の酸素濃度によって大きく変わっており、おそらく現在の人類は進化の過程で現在の空気中の酸素濃度に適応してきたものと考えられる。したがって、低酸素状態でもなく高濃度酸素状態でもない、現在の酸素濃度が最適なのだと思われる。(→「2.2.5.3 地球46億年の歴史と空気の起源」)