

『分子は旅をする ～空気の物語』

解説編の設問と解説

第1章 哲学と宗教 空気とは何か

設問 (30 ページ)

Q1

北緯 30 度、地上 1 万メートルを吹く偏西風に乗ると、11 日間で元の位置に戻ってくる。風の平均速度は何キロメートル／時となるか。ただし地球の半径を 6,378 キロメートルとし、偏西風は蛇行しないと仮定する。

→ 解答へ

北緯 30 度、地上 1 万メートルを一周すると約 34,700 キロメートルとなる。したがって亜熱帯ジェット気流の時速は $34,700 / 11 \times 24 = 130$ キロメートル／時。偏西風の蛇行を考えるともっと速くなり、実際は音速に達する。

Q2

大きな火山噴火では、その地域または地球規模での温暖化または寒冷化が起きる可能性が考えられるが、それぞれの原因を説明しなさい。

→ 解答へ

大きな火山噴火では、水蒸気、二酸化炭素、二酸化硫黄等が火砕流、火山灰と共に噴出される。水蒸気と二酸化炭素は温室効果ガスであり、これらの増加は、地球温暖化につながる。一方、酸化硫黄は成層圏まで運ばれたものが酸化されて硫酸のエアロゾルとなって長時間留まり、太陽光を遮り、その地域または地球規模での寒冷化が起きると考えられる。

Q3

日本では、いつどこの火山でプリニー式噴火が起きているか。

→ 解答へ

1707 年 (宝永 4)、富士山の南東斜面の標高 2,100 ~ 3,100 メートル付近で噴火が起こり、3 つのすりばち状の火口が生じた (宝永大噴火)。噴煙は成層圏に達した。1783 年 (天明 3)、群馬・長野県境に位置する浅間山の噴火では、火口から東南東方向に噴煙が流され、現在の高崎市や熊谷市から関東平野の中央部にまで降灰が及んだ。今日この規模の噴火が起きると、航空機をはじめとするさまざまな交通機関やインフラ施設に甚大な被害を与えると懸念される。

Q4

海岸気候とはどのようなものか説明しなさい。

→ 解答へ

日中には海風が、夜間には陸風が支配的となることが特徴で、低緯度地方では年中、また中・高緯度の地方では暖候季を中心として規則的な風向の変化をみせる。なお季節風の卓越する地方では夏季は海洋性、冬季は大陸性の気候となる。

Q5

空気の成分とその量を実際にどうやって調べられるか。

→ 解答へ

主として教科書や参考書、ウェブ情報から調べることとなるであろう。酸素、水蒸気、二酸化炭素など活性な成分については、化学的に除きながら、重量減少を観察することができるかもしれない。

第2章 世界の創造主 酸化の魔法

設問 (48 ページ)

Q1

鉄を錆びにくくするには、どのような方法が考えられるか。

→ 解答へ

次の3つが考えられる。①空気と触れている表面から錆びてくるので、表面に被覆をする。鉄に塗料を塗ったり、薄い酸化皮膜を作りやすい合金を製造し、使用したりしている。その代表がステンレス鋼である（クロムあるいはクロムとニッケルの合金）。②水と酸素が必要なので、できるだけ表面を乾燥させておく。③ほかの金属と接触させると表面に電池ができて錆びやすくなる。このような状況を避ける。ちなみに純粋な鉄は意外に錆びにくい。

Q2

水は相手次第で、酸化剤にも還元剤にもなる。その例を示しなさい。

→ 解答へ

水は酸化還元反応の生成物となることが多い。しかしイオン化傾向の大きい金属（アルカリ金属）と反応すると還元されて水素を生ずる。フッ素（F₂）のような強い酸化剤には酸化されて酸素を生ずる。

Q3

染色において空気酸化を利用する場合がある。例を示しなさい。

→ 解答へ

染料は独特の色を有し、水に溶けず、繊維とよく結合する性質をもたなければならない。天然の代表的な染料に藍がある。わが国では、緑色をしたタデ科植物のタデアイ（蓼藍）から得られる。インドキシルとグルコースが結合した形（インディカンと呼ばれる）で葉の中に存在する。枯れたり細胞が破壊されたりすると、葉に含まれる酵素が働き、グルコースが外れてインドキシルが出てくる。これは速やかに空気酸化されて、青色のインディゴとなる。水に溶けるインディカンやインドキシルを繊維に付け、その後空気酸化により発色させる。合成染料でも同じような方法がとられることが多い。

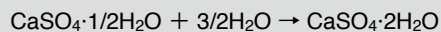
インドキシル(還元体) + 空気中の酸素 → インディゴ(酸化体)

Q4

骨折をした際にギプスで固定する処方を考えなさい。

→ 解答へ

整形外科では次のように処置される。折れた部位がずれていなければそのまま、ずれている場合はもとの正常な位置に「整復」した後、固定に入る。ギプスと骨折部の間に、皮膚を保護するための専用の綿を介在させる。焼石膏は脱水した硫酸カルシウムを水で溶いて、包帯と共に骨折部を覆う。下記の化学反応が徐々に起こり固まる。最近では、グラスファイバーや樹脂が用いられることが多い。



Q5

酸素原子を与えること、水素原子を受け取ること、電子を受け取ること、酸化と定義する。燃焼における酸素は、燃料に酸素を与えて二酸化炭素を生成し、水素原子を受け取り、水を生成する。酸素は酸化剤である。酸素が電子を受け取るとどういった化学種が生まれか。

→ 解答へ

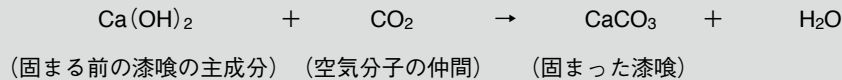
酸素分子（O₂）が電子1個を受け取ると、酸素分子の陰イオン・ラジカル（O₂⁻・）ができる。2個受け取ると、酸素の2価のアニオンができ、これはプロトンが付いて電荷を中和させると、過酸化水素（H₂O₂）となる。さらに電子を1個受け取ると、O-O結合が切れ、水酸化イオン（HO⁻）とヒドロキシルラジカル（HO⁻）が生成される。酸素分子（O₂）が電子を1個ずつ受け取って生ずる一連の化学種を活性酸素と総称する。

Q6

16世紀初頭は、大気中の二酸化炭素濃度は250 ppm程度と今日よりよほど低く、また小氷期中で寒冷だった。これが影響し、イタリアに多くの名画が残っている。フレスコ画が作られた際には、漆喰が今日より固まりにくかったと推定される。その理由を説明しなさい。 [→ 解答へ](#)

フレスコ画が描かれた15世紀～16世紀初頭は、大気中の二酸化炭素濃度は250 ppm (0.025%)程度と今日の0.04%より60%ほどと低く、また小氷期中で寒冷であったというのが条件となる。以下の2つの理由が考えられる。

①フレスコ画は漆喰を下地とし、これが生乾きのうちに水などで溶いた顔料を用いて絵を描く。漆喰は空気中の二酸化炭素を吸って、下記の化学反応により固化する。二酸化炭素濃度が低ければ、その分、固化の速度が遅くなる。



②化学反応は多くの場合発熱反応で、温度が高いと加速される。当時のヨーロッパでは、気温が現在に比べて平均で1～2℃低かった。今日より漆喰は固まりにくかったと推定される。

第3章 サイエンス 魔法の正体

設問 (78 ページ)

Q1

トリチェリが「われわれは空気という大海（大気）の底に沈んで生きている」と言った意味を説明しなさい。 [→ 解答へ](#)

エヴァンジェリスタ・トリチェリは、1643年に空気に重さがあり、その水銀柱にして73センチメートルの重力が地上の全てのものにのしかかっていることを発見した。ミケランジェロ・リッチに宛てた翌年の手紙の中で、「われわれは空気という元素の大海（大気）の底に沈んで生きている」と記している。

Q2

18世紀後半まで、空気の正体を少しずつ明らかにして来た科学者に聖職者が多いのはなぜか。 [→ 解答へ](#)

聖典を読んだり啓示を受けたりして、常日頃、この世を創った創造主の偉業に思いを巡らせる機会が多く、必然的に世界の成り立ちの解明、真理の探究に導かれたからと考えられる。また、そのような時間を持つ経済的、社会的余裕もあったからであろう。

Q3

穏やかな天気の日、静岡で1013ヘクトパスカル (hPa) あった気圧計を持って富士山に登ると、山頂の気圧はどれほどになるか。 [→ 解答へ](#)

大気圧は上方の空気の重みを示す圧力であるので、高所へ行くほど低下する。低高度ではおおよそ10メートル上がるごとに1 hPa 下がり、5,500メートルでは、平地上（海拔ゼロメートル）の約半分となる。大気圏では高度とともに気温 T が $-6.49 \text{ K}/1,000 \text{ メートル}$ の割合で低下する影響も入ってくる。気圧 P は、次の式で与えられる。富士山頂は h = 海拔 3,776メートルであるので、気圧 P は 638 hPa となる。

$$P = P_0 \left(1 - \frac{0.0065h}{T_0 + 273.15} \right)^{5.257}$$

$$T_0 = T + 0.0065h$$

Q4

ロバート・ボイルは 1660 年、次のような実験を行った。釣り鐘型をしたガラス容器の中にバネで鳴り続けているベルを吊るし、この容器内の空気をポンプで抜いていくと、外に聞こえてくる音は次第に小さくなり、やがて聞こえなくなった。この有名な実験を、ガラス容器の中でもベルを実験台の上に直接置いて行くと、真空にしてもなかなか音が消えない。それはなぜか。

[→ 解答へ](#)

実験台の上にベルを直接置いて実験をすると、振動が実験台を伝わって外の空気に伝わり、なかなか音が消えない。

Q5

大気圧 1013 hPa、15°C のとき、230 立方メートルの教室を満たしている空気の重量は何キログラムとなるか計算せよ。その結果は、平均 60 キロの生徒 40 人とどちらが重くなるか。

[→ 解答へ](#)

奥行き 7.5メートル、長さ 9.0メートル、高さ 3.4メートルの教室を想定した。ガリレオ・ガリレイが初めて測った空気の比重は 1/460 であったが、この値には倍ほどの誤差があり、その後正しくは 1/773 とされている。厳密に言うと、空気の密度は 15°C、1013 hPa において 1.22 kg/m³ である。したがってこの教室の容積 229.5 m³ を掛けると、空気の質量は 280 キログラムである。

一方、生徒の体重の総計は 2400 キログラムであるから、空気の重さの約 8.57 倍ということになる。生徒 4~5 人分の体重相当である。

第 4 章 エンジニアリング 水蒸気の威力

設問 (98 ページ)

Q1

空気の構成成分を分け取るのに、18 世紀の科学者が使った化学的方法と 19 世紀後半の技術者が使った物理的方法の要点を示しなさい。

[→ 解答へ](#)

化学的方法：3 つの発見がある。①消石灰の水溶液に通すと炭酸カルシウムの沈殿を生じて白濁する成分として二酸化炭素が見つかった。②ろうそくを燃やし尽きた後に残った成分として窒素が捉えられ、③ものを燃やして失われる成分は、酸化水銀を加熱して出てくる気体と同じものであることとして酸素が見つかった。

物理的方法：空気から水と二酸化炭素を冷やすことによって固化して除く。その空気を断熱膨張させることにより、さらに冷却し液化しておく。液体空気が得られたならば、蒸留管をつけ、徐々に温度を上げていくと、87 ページ表 3 に示した沸点の低い順番に気化してくる。これを別々に集める。

Q2

自動ドアに電気モーター式と圧縮空気式がある。その機構と特徴を調べ、身近なところで、どちらがどこで使われているか述べなさい。

[→ 解答へ](#)

自動ドアは、①センサーが通行者をキャッチする、②制御装置へ信号を送る、③その信号を受けてドアエンジンを動かす、というシステムから成る。③には電気モーター式と圧縮空気式とがある。電車・バスのドアは①の代わりに車掌・運転手が安全を確認して手動で行うが、②と③はほとんど同じと考えて良い。電車では重い電気モーターをドアの数だけ付けるよりは、ブレーキで使う圧縮空気を使う方が軽量で簡単ということで、圧縮空気式が使用された。しかしこれでは空気シリンダーやドアを開閉させる連動機構やリンク機構などの仕掛けが必要で、それらを設置するためある程度のスペースが必要であった。2000 年代になってから、モーターで長いネジ状の棒を回し、そのネジの回転を使用して開閉を行う電気スクリュウ軸駆動式や、リニアモーターを使用するリニアモーター式のドアエンジンが電車では多く採用されるようになってきている。

Q3

トランジスタが発明されるまで、電子回路には真空管が用いられた。フィラメントからプレートに熱電子を飛ばすが、空気分子が残っていると放電を起こし、機能しなくなる。白熱電球よりも確実に中を真空とするために、ゲッターと言って、マグネシウム、バリウムなどの金属を真空管の内側に置き、これを加熱してガスを捕捉している。どのような化学反応が起きているのか、化学式で示しなさい。

[→ 解答へ](#)

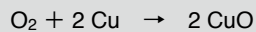
残留窒素は加熱した金属マグネシウムと反応すると $3\text{Mg} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{N}_2$ となって固定される。バリウムは合金に熱をかけ真空管内に揮発させる方法も取られる。 $3\text{Ba} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Ba}_3\text{N}_2$ となる。残留酸素もゲッター金属と酸化的に反応する。

Q4

1890年代にレイリー卿とウィリアム・ラムゼーが行ってアルゴンの発見につながった実験を化学式で示しなさい。

[→ 解答へ](#)

1892年、レイリー卿が空気から酸素、二酸化炭素、水蒸気を除いた「窒素」の密度は1リットル1.2572グラムあった。酸素は加熱した銅の上を通すことによって除いた。

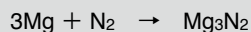


一方、化学反応で合成した液体アンモニアを通して空気をバブルさせ、出てきた気体を過熱管を通すことにより、窒素を合成した。



この化学的に作った窒素ガスは、1リットル1.2505グラムしかないことを発見し、空気中から純粋にしたと思える窒素には、何か重い成分が残っているのかもしれないと考えた。

この講演を聴いたウィリアム・ラムゼーは、1894年に空気中から採取した「窒素」を繰返し赤熱した金属マグネシウムの上を通し、窒化マグネシウムを形成させることによって窒素を除いた。



最後に残った気体がアルゴンであった。

Q5

周期表の113番元素について知っていることを述べなさい。

→ 解答へ

ロバート・ボイルは「元素とは混合物や化合物とは異なり、実験によってそれ以上単純な物に分けられないもの」と定義している。アントワーン・ラヴォアジエも「元素とは化学分析の手法ではそれ以上分割できない到達点となる純物質である」と言っている。この考えに従って新しい元素は探し求められ、混合物の中から分け取られ、また化合物の中から取り出されてきた。

放射性元素が見つかったから様相が変わった。寿命を持ち他の元素に変わっていくものが見つかった。また、加速器を使って原子を衝突させたり、原子に中性子やガンマ線を衝突させて新しい元素を作ることが可能となった。原子番号の大きな元素は、多くがそのように合成されるようになった。

理化学研究所仁科加速器科学研究センター超重元素研究グループ森田浩介主任研究員（現九州大学大学院教授）は、2004年に線形加速器を用い、約30,000 km/sにまで加速した ^{70}Zn （亜鉛）を ^{209}Bi （ビスマス）に衝突させることで「113番元素」の合成に成功した。さらに2005年に続き、2012年8月に3度目の合成とその新たな崩壊経路を確認することにも成功した。これは、新元素の発見の「確定」につながる成果である。
<http://www.nishina.riken.jp/113/history.html>

2016年6月8日、発見者である森田浩介らによって、113番元素にニホニウム（Nihonium、元素記号Nh）の名前が提案された。国際純正及び応用化学連合（略称IUPAC）という世界の化学者の連合体の無機化学部会で審議され、2016年11月28日付けで承認決定された。IUPACはまた同日併せて下記の3元素の新しい命名の提案を承認したと発表した。

- ・115番元素モスコビウム、記号Mc
- ・117番元素テネシン、記号Ts
- ・118番元素オガネソン、記号Og

第5章 衣食住の充実 人口増加と食料生産

設問（114ページ）

Q1

アルゴンは中高の教科書では「希ガス」と書いているが、公益社団法人日本化学会は「貴ガス」と呼ぶべきであると推奨している。それはなぜか。

→ 解答へ

希ガス、希元素は文字通り、天然に存在する割合が他のガス、元素などと比べてかなり少ない（資源としては貴重な）ものを指して呼ばれた。しかしアルゴンは大気中で3番目に多いガスで、温室効果ガスとして問題視される二酸化炭素の20倍以上も豊富に存在する。3章の設問（5）で取り上げた230立方メートルの教室の空気281キログラムの中で、アルゴンは3.9キログラムを占めている。とても希（まれ）なガスとは言えないだろう。

また他の元素と化合物を作りにくい不活性なガスで資源としても貴重である。そこで国際純正応用化学連合（IUPAC）では18族元素をnoble gasと呼ぶことに決めた。日本化学会はこれに従い、貴ガスと呼ぶべきであると推奨している。

Q2

大気中のNO_xというと、燃料の中に含まれるさまざまな窒素化合物が燃えて出てくるものと思いがちだが、最近は高温の燃焼で空気中のN₂が酸化されて生成している場合が多い。この違いを説明しなさい。

→ 解答へ

1950年代の終わり頃までは、エネルギーを得るための燃料に、褐炭をはじめとする質の悪い石炭が用いられた。これらを燃やすと、燃料の中に含まれるさまざまな窒素化合物が燃えて煙突からNO_xが出てきた。年配の方は大気中のNO_xと言うと、これを指すと記憶している。エネルギー資源が石油、天然ガスと変化してくると、原料に含まれる不純物としての窒素化合物が漸次減少してきた。一方、最近ではボイラーを高温の燃焼で運転するようになり、またディーゼルエンジンに見られるように、内燃機関も高圧高温となり、空気中のN₂が酸化されてNO_xが生成している場合が多くなっている。

Q3

下記の業績のうち、英国学術協会会長を務めたウィリアム・クルックス卿と関係ないものを消しなさい。

- a) 科学ジャーナリストとして論文誌 *Chemical News* を創刊し編集長を務めた。
- b) マイケル・ファラデーのクリスマス・レクチャーを筆記し、ファラデーの名著 *The chemical history of a candle* の出版を助けた。
- c) 元素タリウムを発見した。
- d) 当時としては真空度の高い (0.1 ~ 0.0005 Pa) クルックス管と呼ばれる放電管を作成し、電子を発見した。
- e) ノーベル賞を受賞した。
- f) 心霊現象研究協会の創設に加わり、会長を務めた。

→ 解答へ

e)。英国学術協会会長を務めたウィリアム・クルックス卿は、独学で実に多彩な業績を上げた科学者ではあるが、ノーベル賞は受賞していない。

第6章 地球と未来 大気環境と地球温暖化

設問 (141 ページ)

Q1

同じ化学物質であるオゾンに、善玉と悪玉があることを説明しなさい。

→ 解答へ

成層圏のオゾン層にあるオゾンは、地球上に降り注ぐ太陽光のうち短波長の紫外線を吸収するフィルターの役割を果たし、地球上の生物の DNA をはじめとする構成要素が光化学損傷を受けるのを防いでいる。したがって善玉であり、オゾン層の破壊は危惧される。一方、大気圏において光化学スモッグなどで生成するオゾンは、動物の呼吸器疾患を誘発したり植物の葉を痛めたりするなど、環境汚染物質であるため悪玉とされる。

Q2

数年かけて本書を執筆する間に、大気中の二酸化炭素濃度は 0.038% から 0.040% に増加した。アメリカ国国立海洋大気庁が出している CO₂ 濃度カウンターやこれを整理したネット情報に注目してみよう。

<https://www.co2.earth/>

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

後者は大気中の二酸化炭素濃度を赤の点線で示し、毎年 5 月にピークが現れ、次第に減少し、9、10 月に極小値を取っています。ピーク同士、ミニマム同士あるいは全体平均を比べると右肩上がりであることが分かる。このデータはハワイのマウナ・ロア山頂で観測されたもので、ここが北半球に位置していることを考慮し、毎年ピークとミニマムが出現する季節変化が、何を意味しているか考えなさい。

→ 解答へ

米国国立海洋大気庁が出している CO₂ 濃度カウンターやこれを整理したネット情報によると、北半球に位置するハワイのマウナ・ロア山頂の清浄大気中の二酸化炭素濃度は、全体的に右肩上がりで増加しているが、詳細に見ると毎年 5 月にピークが現れ、次第に減少し、9、10 月に極小値を取っている (124 ページ、図 12 参照)。5 月には若葉が出そろう植物の光合成が活発になるので、大気中の二酸化炭素濃度は減少し始め、秋の紅葉が始まるとこれが止まる。冬に向けて落ち葉や倒木についての微生物の活動が盛んになり、その呼吸で二酸化炭素濃度が増加し始める。雪の下でもこれは起こっており、5 月を迎える。こうしてノコギリ歯のパターンが出来上がる。

南半球ではこれと 6 カ月位相を異にする現象が起きており、全球で平均すると差し引きゼロとなるが、貿易風の吹いている赤道を越えての大気の移動には、おおよそ 1 年を要し、週単位での平均化は起こらない。

Q3

通常の空気の成分を変えるだけで、防腐剤や防虫剤、添加物を使わない保存方法が開発され、調整大気包装 (modified atmosphere packaging) と呼ばれ、食品や美術品の保存に利用され始めている。空気成分のどれをどのように調整するのか考えてみよう。

→ 解答へ

第6章の冒頭で、空気中の酸素濃度が0.1%以下となると、大抵の昆虫、かび、好気性細菌さえ生育が阻害されることを指摘した。密閉容器に酸素吸収剤を同封することで、食品の保存が改善される。調整大気包装 (modified atmosphere packaging) または IMP (総合的有害生物管理) と呼び、美術品などの保存に利用され始めている。

第7章 分子と人間 未来を見つめて

設問 (156 ページ)

Q1

あなたが身の回りで一番気になる大気汚染は何か。

→ 解答へ

大気汚染は、地域や季節の違いによりさまざまに発生する。主要幹線道路沿いで生活している人には、ディーゼルエンジンの排出する NOx や炭素微粒子が問題であろう。日本海および東シナ海に面した地域では、黄砂やこれに伴う PM2.5 であろう。日照が強く風の弱い日には、光化学スモッグが各地で発生する。工場から排出される排煙・悪臭もあろう。むしろあなたの身の回りで一番気になる大気汚染が何であるか、ぜひ、教えて頂きたい。

Q2

本書を読了し、空気の成分とその量をどのようにして調べるか。

→ 解答へ

4章 (1)、(3)、(4) の解答を踏襲することができる。それとは別に、本書では触れなかったが、実用的なくつつかの酸素センサーが開発されている。これらには、酸素の還元電位を使った電池式、常磁性に着目した磁気式、波長可変半導体レーザー分光式があり、酸素濃度の範囲や温度範囲によって選ぶことができる。

Q3

産業革命前と今日とでは、大気中の二酸化炭素濃度は1.5倍に増えている。地球温暖化と並行して、次の事項にはどのような影響が現れているか。

- ①植物の光合成
- ②大理石の建物、屋外に置かれた彫刻など
- ③海の珊瑚礁

→ 解答へ

大気中の二酸化炭素濃度が1.6倍に増えていることの影響は、

- ①植物の光合成は間違いなく加速される。ただしその結果は簡単でなく、炭水化物の生成は増えても、含窒素化合物は減少する。植物の種類によっても異なる可能性があり、中長期的には種のバランスが乱されかねない。
- ②タジマハール、ケルン大聖堂に代表されるような大理石 (石灰岩) でできた屋外の文化遺産 (建造物、彫刻) が酸性雨に浸食されている。酸性雨の主役は二酸化硫黄であるが、NOx の次に二酸化炭素がくる。
- ③人間活動によって大気中に放出される二酸化炭素の30～40%は海洋に溶け込む。この間、海の浅い所から酸性化が進み、pHにして8.2から8.1になっている。海のサンゴ礁の形成に必要な CO_3^{2-} 濃度が減少し、サンゴの白化が起り、やがて死滅する危険がある。