

まえがき

「風はなぜ吹く?」, 「空はなぜ青い?」, 「フットボールはなぜ落ちる?」, 「太鼓を叩くとなぜ音が出る?」などと聞かれると、私たちはどこまで答えられるでしょうか。

これらは、いずれも空気が関与している問題です。本書は、このような日常のちょっとした疑問や普段何気なく見過ごしている問題を、科学の眼で見ることを意図して書いたものです。ところが、日常の身近な現象は、簡単なようで、説明が困難である場合が多いようです。本書は、そのような現象に対する説明をなるべくわかりやすく、高校生程度の知識でわかるように、なおかつなるべく原理にまで遡って解説することを試みました。

私たちは空気に依存し空気の中で生活していますが、空気は見えないことから日常生活の中でそれを意識することはあまりありません。私たちは呼吸で酸素を取り入れて生命活動に使っていますが、地球ができた当時は酸素がほとんどありませんでした。地球に酸素をもたらしたのは、藻類などが太陽光を利用して光合成を行ったためです。水と二酸化炭素から炭水化物を合成して酸素を放出し、30億年以上の長い年月をかけて今の空気組成になったと考えられています。したがって、私たちが呼吸している酸素の元は地球上にあった水を光合成生物が分解して得られたものです。

動物は動くので多くのエネルギーを使いますが、そのエネルギーは食物を呼吸による代謝の作用によって得ています。そのため、動物は口、鼻、気門から空気を取り入れ、気管、肺、気嚢、血液の流れによって細胞レベルに至るまで酸素を身体の隅々にまで運ぶシステムを発達させました。陸に棲む動物は空気を直接吸入しますが、水中に棲む魚類は水に溶けた空気を鰓で取り入れて呼吸しています。動物だけでなく植物も生きていくにはエネルギーが必要で、光合成で得たグルコースを呼吸によって分解して利用しています。

生物にとって空気はなくてはならぬものですが、最近その空気が汚れてきていま

す。化石燃料の大量使用によって発生するPM2.5, SO_x, NO_xなどの有害浮遊物によって健康を害する人が出てきています。化石燃料は私たちの生活にとってなくてはならぬものですが、その使用にあたり有害成分濃度を減らす必要に迫られています。さらには、化石燃料の大量使用によって空気中の二酸化炭素が増えて地球が温暖化していると言われていています。それによると考えられる海面水位の上昇や異常気象が観測され、生態系や人類の活動への悪影響が懸念されています。

私たちが住む地球には至る所に水と空気があり、太陽の光が降り注いでいます。水と空気と太陽、この組合せが様々な気象現象を生み出します。海に太陽の光が当たると水蒸気が発生し、湿気を含んだ空気が上昇気流となって上空まで持ち上げられます。上空で冷やされた空気は雲となり、水滴、氷の粒、雪片を生じ、雨、雪、雹^{ひょう}となり地上に落下します。発達した積乱雲では上昇気流と下降気流が発生し、空気の流れは乱流となり、時には竜巻などの突風が発生します。

風は空気の疎密によって発生しますが、乱流となった空気の流れは渦を伴います。飛行機、鳥、昆虫が空を飛ぶのは空気の疎密が関与していますが、それぞれの飛び方が違うのは、渦を伴う乱流への対処または利用の仕方の違いにあります。球技でボールに回転を与えると、思う方向または思わぬ方向に変化する理由も空気の疎密と渦を伴う乱流が関与しています。

私たちは話したり他人の声を耳で聞いたりして人とのコミュニケーションをとっていますが、空気がなければ音は伝わりません。その声を聞けば誰の声かわかりますが、口から喉の奥までの共鳴腔の形がその人固有の形をしているからです。楽器の音色も楽器固有のものがあり、私たちはそれを空気の疎密波の形から判断しています。

本書は疑問形で書かれた問題に関して解説されていますが、始めから順に読み進めても良いし、関心がある話題について拾い読みしても良いようになっています。したがって、どこから読み進めても結構です。また、解説の終わりには「まとめ」が数行で書かれています。疑問形で書かれた問題に関する回答を自分で考えて「まとめ」を読んで比較するのも良いし、解説を読んで自分が理解した内容を「まとめ」と比較してみるのも良いかも知れません。

若者の読書離れ、理科離れが言われる今日、日常の何気ない現象に目をとめ、「なぜ?」という疑問を持つこと、そして子どもが発信してくる疑問に大人が答えることができることが求められます。その答え方次第で子どもたちは自然や身近で経験する現象に対する関心を深め、好奇心を広げ、世界の広がりや奥深さを感じる

に違いありません。

「科学の眼で見る日常の疑問」という視点は、筆者が千葉大学教育学部に勤務し始めた当初から教員を目指す学生に求めた視点でした。当時の稲場研究室に属した学生諸君の一部には卒論でも自ら疑問を見出し、それについて調べて発表してもらいました。本書を出版することができたのは、当時の研究室での議論や実験室での実験を通した問題意識が基礎になっています。当時の共同研究者であり、現在千葉大学教育学部准教授の林英子さんおよび当時の学生諸君に感謝したいと思います。本来なら本書を千葉大学の定年退職後それほど時間を置かずに出版したいと考えていました。ところが、定年になる少し前に次女を亡くし、その後、筆者が原因不明の病気になったため出版を諦めていました。その後数年間のリハビリを経て好きなテニスができるまでに回復し、今回ようやく念願の出版が可能となったことは大きな喜びです。

本書の出版を認めてくださった技報堂出版(株)編集部長の石井洋平氏および直接編集に携わってくださり有益な助言を頂いた同社編集部の小巻愼氏に深く感謝したいと思います。

本書は、筆者の孫である三浦隆明君^{たかあき}および稲場咲樹美ちゃん^{さきみ}に捧げたいと思います。この4月に、隆明君は中学生、咲樹美ちゃんは3才になる予定ですが、二人を日本の将来を担い21世紀後半を生きるであろう少年少女の代表とさせて頂きたいと思います。

2016年3月

稲場 秀明

目 次

第1章 空気とはどんなもの	1
1話 空気は何からできている?	2
2話 空気はどうして見えない?	4
3話 空気の存在をどう確かめる?	6
4話 空気の重さは?	8
5話 空気の成分はどんな性質を持つ?	10
6話 空気の成分をどう測る?	12
7話 空気が液体や固体に?	14
第2章 地球と空気	17
8話 地球ができた時から空気は今のようだった?	18
9話 上空のどの辺まで空気がある?	20
10話 地球の大気の循環はどうなっている?	22
11話 二酸化炭素の増加でなぜ温暖化?	24
12話 地球温暖化説に懐疑的な人たちはどんな考え?	26
13話 地球上のオゾン層が少ないとなぜ問題?	28
第3章 気象と空気	31
14話 風はなぜ吹く?	32
15話 偏西風は気象にどのような影響を与える?	34
16話 異常気象はどのようにして起こる?	36
17話 大気が不安定というのはどういう状態?	38
18話 台風はなぜ発生する?	40
19話 竜巻はどのように発生する?	42
20話 フェーン現象はどうして起こる?	44
21話 雷はどうして発生する?	46

第4章 色と光と空気	49
22話 空はなぜ青い?	50
23話 夕焼けはなぜ赤く見える?	52
24話 月や火星から見た空は何色?	54
25話 白い雲はなぜ白く、黒い雲はなぜ黒く見える?	56
26話 雨上がりに、なぜ虹は7色に見える?	58
27話 曇気楼はなぜ発生する?	60
28話 日の出前、日没後に薄明るいのはなぜ?	62
第5章 汚れた空気ときれいな空気	65
29話 タバコはなぜ健康に良くない?	66
30話 窒素酸化物はどのように発生する?	68
31話 大気中に浮遊する粒子状物質はどのように発生する?	70
32話 光化学スモッグはなぜ発生する?	72
33話 花粉でなぜアレルギーになる?	74
34話 光触媒を使ってどこまで空気を浄化できる?	76
35話 森の空気はなぜおいしい?	78
第6章 室内の空気	81
36話 換気はなぜ必要?	82
37話 シックハウスとは何?	84
38話 空気清浄機はどのように室内の空気をきれいにする?	86
39話 1台のエアコンでどうして冷房も暖房もできる?	88
40話 除湿機、加湿器はどのように湿気を調節する?	90
第7章 スポーツと空気	93
41話 カーブはなぜ曲がる?	94
42話 フォーシームは真っ直ぐなのに、ツーシームはなぜ変化する? ..	96
43話 フォークボールはなぜ落ちる?	98
44話 硬式テニスの強打になぜトップスピンの多く使われる?	100

45 話	バレーボールのフローター系無回転サーブはなぜ揺れて落ちる？ …	102
46 話	ゴルフボールの表面になぜディンプルがある？ ……………	104
第 8 章	空を飛ぶ ……………	107
47 話	飛行機はなぜ飛べる？ ……………	108
48 話	ヘリコプターはなぜ飛べる？ ……………	110
49 話	鳥はなぜ飛べる？ ……………	111
50 話	鳥は種類でなぜ飛び方が違う？ ……………	112
51 話	昆虫はどのように飛ぶ？ ……………	114
52 話	トビウオはどのように飛ぶ？ ……………	116
第 9 章	呼吸と空気 ……………	121
53 話	動物はなぜ空気がないと生きていけない？ ……………	122
54 話	スポーツでは呼吸法がなぜ大切？ ……………	124
55 話	どのように人工呼吸をする？ ……………	126
56 話	酸欠になるとどうなる？ ……………	128
57 話	昆虫はどのように呼吸をしている？ ……………	130
58 話	チョウはどのように呼吸をしている？ ……………	132
59 話	鳥はどのように呼吸をしている？ ……………	134
60 話	クジラはどのように呼吸している？ ……………	136
61 話	魚はどのように呼吸している？ ……………	138
62 話	植物はどのように呼吸している？ ……………	140
第 10 章	燃焼と空気 ……………	143
63 話	着火と消火にはどんな方法がある？ ……………	144
64 話	ろうそくの炎は内側と外側でなぜ色が違う？ ……………	146
65 話	水素爆発はどのようにして起こる？ ……………	148
66 話	鉄は燃える？ ……………	150
67 話	火事で煙に巻かれるとなぜ危険？ ……………	152

第11章 空気の圧力	155
68話 どうしたら空気の静止圧力を感じることができる？	156
69話 空気圧はどのように使われている？	158
70話 電車の空気ブレーキはどのように作動する？	160
71話 自動車タイヤの空気圧はどんな役割を果たしている？	162
72話 高山病になるのはなぜ？	164
第12章 音と空気	167
73話 太鼓を叩くとどうして音が出る？	168
74話 人はどのようにして音を聞き分けている？	170
75話 糸電話でどうして話せる？	172
76話 人の声はどのように出る？	174
77話 楽器はどのように音を出している？	176
78話 人の声はどのようにして録音、再生できる？	178
79話 山びこの声はどうして戻ってくる？	180
80話 救急車が通り過ぎるとなぜ音が変わる？	182
81話 音の反響を利用して餌を取る動物は？	184
第13章 宇宙と空気	187
82話 地球以外の惑星には空気はある？	188
83話 太陽には空気はある？	190
84話 宇宙船が大気圏に突入する時なぜ発熱？	192
85話 宇宙ではなぜ宇宙服を着る？	194
86話 宇宙船内の空気はどのように管理されている？	196
87話 宇宙から見た地球は何色？	198

第1章 *1* 空気とはどんなもの

.. 1話 空気は何からできている? ..

古代ギリシャでは、空気は気、土、火、水の4つの元素の一つとされていた。この考え方は中世および近代の始めまで受け継がれていた。18世紀になって、ようやくラヴォアジエが、空気は酸素と窒素の混合物であることを示し、空気を元素とは考えなくなった。

私たちは空気に依存し、空気の中で生活しているが、日常生活の中でそれを意識することはあまりない。空気は常に身の回りにあり、なくてはならない存在であることの例えから、ごく親しい仲を「空気のような」と表現することもある。

空気は、地球の大気圏の最下層にある気体のことを言い、無色透明で、複数の元素からなる気体の混合物である(表1)。その他に水蒸気が含まれ、地球全体の平均では約0.4%である。その量は時と場所により大きく変動し、一般的に空気の組成は表1のように水蒸気を含まない乾燥空気の形で示されることが多い。

空気の中で人間や生物にとって最も重要なのは酸素で、この元素がないと呼吸できない。この酸素と窒素だけで全体量の99%近くを占めている。その次に多いのがアルゴンの0.934%である。

二酸化炭素(炭酸ガス)は、植物の光合成には必須の気体で、その量はたったの0.035%しか含まれない。しかし、18世紀にはその濃度は0.028%、20世紀の半ばには0.03%で、それが増え続け0.035%になり、現在の地球温暖化をもたらしつつあるとして問題となっている。

二酸化炭素以外の微量の気体も人間や生物が生存していくのに重要な影響を与えているものがある。例えば、メタンガスは、二酸化炭素とともに温室効果ガスとしてその増加が懸念され、硫黄酸化物や窒素酸化物は、健康被害を与えるガスとして排出が規制されている。また、オゾンは、プラスチックやゴム等を劣化させるとして問題となっているが、逆

表1 空気の組成

成分	化学式	体積(%)
窒素	N ₂	78.084
酸素	O ₂	20.9476
アルゴン	Ar	0.934
二酸化炭素	CO ₂	0.035
ネオン	Ne	0.001818
ヘリウム	He	0.000524
メタン	CH ₄	0.000181
クリプトン	Kr	0.000114
二酸化硫黄	SO ₂	0.0001
水素	H ₂	0.00005
一酸化二窒素	N ₂ O	0.000032
キセノン	Xe	0.0000087
オゾン	O ₃	0.000007
二酸化窒素	NO ₂	0.000002

に上空 10～50 km の成層圏でのオゾン濃度が減ると太陽からの紫外線量が増える。それが白内障や皮膚がんの原因となり、その動向が注視されている。

また、表 1 にない気体を無視していいかと言えば、そうではない。極微量でも問題となる気体にフロンガスがある。フロンにはいくつかの種類があるが、そのいずれもが成層圏にあるオゾン層を破壊する。そのため太陽からの紫外線が増える原因となり、その使用は禁止されている。しかし、今まで放出されたものがあるため、この問題は解決していない。

さらに、空気中にはエアロゾルという液体や固体の粒子状物質が空中に浮遊している。エアロゾルを空気の中を含めない人もいるようであるが、定義の問題は別として現に空気中に存在し、人間や生物の生活に多大な影響を与えている物質を無視することはできない。エアロゾルの微粒子のサイズは、10 nm (1 nm = 10^{-9} m) 程度から 1.0 mm 程度まで様々で、気象分野では、各種の塵、雲の凝結核、太陽光放射、火山爆発等に関連していて、もとから重要な研究対象である。今日では、地球温暖化やオゾン層破壊等、大気環境問題でも重要な要因として注目されている。エアロゾルの種類は、固体の煙や粉塵、微小な液滴粒子、硫酸化物等の有害物質、大気中に浮遊する粒子状物質で粒径が $10 \mu\text{m}$ 以下のもの、大気中のガス状物質が光化学反応等によって粒子状物質に転換したもの、花粉や孢子等がある。中国等で問題となっている大気汚染物質のうち、PM2.5 と呼ばれる粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 以下のエアロゾルが呼吸器への害が大きいと言われている。

まとめ 空気は地球の大気圏の最下層にある気体である。主成分は窒素約 78 %、酸素約 21 %で、残りの大部分はアルゴン等の稀ガスである。人間にとって酸素は重要な気体で、酸素がないと呼吸ができない。二酸化炭素は植物の光合成には必須の気体だが、0.035 %しか含まれていない。しかし、近年、その濃度が増加しており、その温室効果による地球温暖化が懸念されている。空気中にはエアロゾルという粒子状物質が浮遊している。エアロゾルは気象に影響を与え、また健康被害を与える物質としても注目されている。



2

第 2 章 地球と空気



・ 8話 地球ができた時から空気は今のようだった? ・

地球が誕生した46億年前頃の原始大気は、主にヘリウムと水素からなり、水蒸気も含まれており、その温室効果で高温、高圧であったようである。現在の太陽の大気と似た成分である。しかし、これら軽い成分は、原始太陽の強力な太陽風によって数千万年のうちにほとんどが吹き飛ばされてしまったと考えられている。やがて、太陽風は太陽の成長とともに次第に弱くなっていく。

その頃には、地表の温度が低下したことで地殻ができ、地殻上で多くの火山が盛んに噴火を繰り返し、二酸化炭素とアンモニアが大量に放出されていた。水蒸気と多少の窒素も含まれていたが、酸素は存在していない。この原始大気は、二酸化炭素が大半を占め、微量成分として一酸化炭素、窒素、水蒸気等が含まれ、現在の金星の大気に近いものであったと考えられている。100気圧程度という高濃度の二酸化炭素の温室効果により、地球が冷えるのを防いでいたと考えられている。

太陽系の始まりは、地球を含め全部同じで、地球も火星も金星も、最初の組成は同じであった。しかし、現在の大気の組成を見ると、表4のように地球だけ違っている。

では、なぜ地球だけ大量にあった二酸化炭素がほぼ消失し、酸素が新たに現れたのか。これには、地球だけが液体の水を大量に含む環境にあったことと、そのような環境から生まれた生物の誕生をその大きな要因として挙げるができる。

表4 地球、火星、金星の大気

	地球	金星	火星
窒素	78.084%	1.8%	2.7%
酸素	20.946%	—	—
二酸化炭素	0.035%	98.1%	95.3%
大気圧	1気圧	90気圧	0.006気圧

海洋は、古い変成岩に含まれる堆積岩の痕跡等から、40億年前頃に誕生したとされている。海洋は、原始大気に含まれていた水蒸気が火山からの噴出と温度低下によって凝結し、雨として降り注いで形成された。初期の海洋は、原始大気に含まれていた亜硫酸や塩酸が溶け酸性であったものが、陸地の金属イオンが雨とともに流れ込んで中和されていった。中和されると、二酸化炭素が溶解できるようになり、大気中から海へと溶けていった。海の中には地中に含まれるカルシウムも流れ込んでおり、二酸化炭素が海水中でCa²⁺と結びついて石灰岩(CaCO₃)となり沈殿した。この繰り返しによって大気中から二酸化炭素は徐々に減っていくことになる。

地球に酸素が誕生したのは、今から約 35 億年前であると言われている。始めて酸素をもたらしたのは、海中に棲むラン藻植物で、紫外線がほとんど届かない深さ 10 m 程度の海中に棲み、光合成により酸素を作り、海の中へ放出していた。さらに、二酸化炭素が生物の体内に炭素として蓄積されるようになり、長い時間をかけて過剰な炭素は化石燃料、生物の殻からできる石灰岩等の堆積岩といった形で固定されていった。やがて、ラン藻が放出した酸素で海の中がいっぱいになり、放出された大量の酸素は当時の海水に多量に含まれていた鉄イオンと結び付き、酸化鉄になった。それらは海底に鉄鉱石を作り、海中の鉄イオンが減ってくると、余った酸素が大気中に放出されることとなった。大気中の酸素は、初期の生物の大量絶滅とさらなる進化を導くことになる。

約 4 億年前、生物の進化において大きな出来事が起こった。大気中の酸素が紫外線による反応でオゾン層を形成したのである。紫外線は、生命が子孫を残すために欠かせない遺伝物質 DNA を破壊する。オゾン層の生成により地表では紫外線が減少し、生物が陸上に上がる環境が整った。

その後、地球上に現れた細菌や藻等の光合成生物が太陽光を利用し、二酸化炭素を吸収して炭水化物を合成し、大量の酸素を放出し、長い年月をかけて大気中の酸素濃度を増加させ、最終的に今の空気組成になったと考えられている。

まとめ 地球が誕生した 46 億年前頃の原始大気は、主にヘリウムと水素からなっていた。これらの軽い成分は、原始太陽の強力な太陽風によって数千万年の間にほとんどが吹き飛ばされた。その頃の地球の大気は、現在の金星や火星と同じで、二酸化炭素と窒素が大部分で酸素はなかった。二酸化炭素は、その後できあがった海の中に溶け込み、カルシウムと反応して量が減った。その後、地球にラン藻植物等が現れると、光合成によって二酸化炭素を消費して酸素を放出し、長い期間をかけて現在の大気になったと考えられている。

第 13 章 宇宙と空気

13

・ 82 話 地球以外の惑星に空気はある？ ・

地球型惑星と木星型惑星では、地殻および大気の構成が大きく異なっている。違いの主要な原因は、太陽からの距離とその後の進化の過程にある。太陽に近い地球型惑星は温度が高く、大量の水素、ヘリウム等の軽いガスをつなぎ止めておくことができなかつたのに対し、木星型惑星は、Tタウリ段階と呼ばれる大陽風の多くの吹き出しによる惑星からの大気の剥ぎ取りの影響を受けなかつた。その結果、地球型惑星は小さいが、密度が高い地殻を持ち、二次大気を持っている。木星型惑星は大きい、密度の低い成分からなり、水素、ヘリウムを主成分とする大気を持っている。太陽に近い水星、金星、地球、火星が地球型、木星、土星、天王星、海王星が木星型に分類される。

太陽からの距離等の条件のもと、それぞれの惑星に独自の気体がある。水星には大気はほとんどなく、地球の衛星の月にも大気はない。水星は重力が小さく、長く大気をとどめておくことは難しい。水星の気圧は 10^{-7} Pa 程度と推測され、その主成分は水素、ヘリウムである。月も重力が小さく、長く大気をとどめておくことはできず、ガス放出に伴う気体があるだけである。ガス放出は、地殻やマントル中の放射性崩壊によってラドンやヘリウム等の成分、もう一つは、流星塵や太陽風等の月面への衝突による成分である。地球型惑星を取り巻く大気の組成を表8に示す。

太陽系で太陽に2番目に近い惑星、金星の大気圧力は90気圧である。大気の組成はほとんど二酸化炭素である。硫酸でできた何kmもの厚さの雲の層があり、これらが金星表面を完全に覆い隠している。この大気はとても大きい温室効果を及ぼし、表面温度が500℃にも達する。1989年に打ち上げられた探査機マゼランが地球に送ってきた情報によると、金星の高度50km以上からは、気圧と気温が地球と似ている。高度52.5kmと54kmの間の気温は37℃と20℃で、高度49.5kmの気圧は地球の海拔0mとほぼ同じである。

火星は非常に薄い大気を持っている。二酸化炭素(95.3%)が大気の大部分で、窒

表8 地球型惑星の大気の組成 [体積(%)]

	金星	地球	火星
窒素	1.8	78.09	2.7
酸素	0.0001以下	20.95	0.13
アルゴン	0.02	0.93	1.6
二酸化炭素	98.1	0.035	95.32
一酸化炭素	0.004	微量	0.08
水	0.1以下	0~2	微量

素(2.7%)、アルゴン(1.6%)、ごく微量の酸素(0.13%)と水蒸気(0.03%)からなる。火星地表面での平均気圧はわずか約7hPaで、地球の1%以下である。

木星型惑星の木星、土星、天王星、海王星のいずれも、地球より直径で4倍以上、質量で10倍以上のサイズで、密度の小さい惑星である。木星は、中心に様々な元素が混合した高密度の中心核があり、その周りを液状の金属水素とヘリウム混合体が覆い、その外部を分子状の水素を中心とした層、その外側を金属水素が取り巻いている。大気に相当するのは水素やヘリウムである。土星は、木星よりやや小ぶりながら構造はほぼ同じで、大気に相当するのは水素やヘリウムである。天王星は、コアのすぐ外側に水、アンモニア、メタンの3種類が混合した氷からなるマントルがあり、その外側を水素、ヘリウム、メタンの混合ガスが覆っている。

まとめ 地球と同じ空気があるかと言えば、ないというのが答である。しかし、大気は存在し、地球型惑星と木星型惑星では組成が大きく違う。地球型惑星である金星や火星では、二酸化炭素が大気の主成分で、あとは少量の窒素やアルゴンである。金星の大気圧は90気圧と大きく、その温室効果で表面温度が500℃にも達する。火星の大気圧は7hPaと小さく、組成は金星と同様である。木星型惑星では中心部が固体状の水素で、大気は水素とヘリウムが主成分である。