

# まえがき

著者の所属する早稲田大学人間科学部（以下「本学」）は「文理融合」を謳い、学生は多様な学問分野に触れることができる。大気環境化学は「自然」の現象だけでなく「人間」の営みも重要という点で、文理融合の一例といえる。さて本学には、いわゆる文系科目は得意だが理系科目が不得手な学生が多いのが実情である。化学になじみのない学生が多い。理系寄りの学生でも、化学は自信がない、数値計算・数式変形・論理的思考は得意ではない、という場合もある。一方で、大気環境化学を扱う和書の多くは、大学化学（最低でも高校化学）の習得を前提として、学部4年生や大学院生を対象とする。環境化学全般を扱う本もあるが、多様な環境問題に広く浅く触れるものが多く、大気環境に特化して学ぶにはそぐわない（そうした本で勉強したつもりになっても困る）。本学での講義に適する教科書が見当たらないのである。本書の執筆依頼を頂戴したことは「渡りに舟」であった。

以上の経緯から、本書の対象としては本学学生のような化学になじみのない方を想定した。化学の基礎のうち本書と深く関連する事項には最低限の説明を加えた（ただし、一から十まで説明する余裕はないので詳細は各自で高校化学の教科書を勉強すること）。大気環境化学を扱う講義・実習・演習・卒業研究などに際して、予習や復習に本書を活用すれば理解は深まるであろう。また、宿題や研究でのデータ解析の際に、本書を辞書代わりに使ってもよい。例題を各所に配したので、最初は独力で考え解いてほしい。例題には解答例などを付したので、自分の考えが合っているか、何が違ったかを確かめて理解を深めてほしい。実際の大気環境問題を考えるには、学んだことを正しく応用する必要がある。応用としての練習問題も用意したので、ぜひチャレンジしてほしい。考え方や解き方の鍛錬を通して、知識・経験・能力を身につけよう。本書の該当箇所や他資料を正しく参照しつつ、電卓やPCも使いこなしながら、正しい結論にたどりつく練習をしよう（大学での研究はこの作業の繰り返しである）。題材にかかわらず、物事を地道にこなして問題を解決する経験は、社会に出て生きるはずである。

なお本書は、一般の方々にも読んでほしい。環境問題対策は、多くの人の理解と協力が重要である。近年の環境への関心は高いものの、内容の難しさや取っ付きにくさもあり、理解できないことも多いのではないか。本書が、「大気環境を知りたい」「ほかの人にも伝えたい」という読者の要望に応じる選択肢の一つとなれば幸いである。無論、これから大気環境化学を専門に深く学ぼうという方々にも、本書を入門書の一つとして活用してほしい。他書

ii ま え が き

と本書で補完しあえれば嬉しい。

本書に触れて、光化学オキシダントをはじめとする大気環境化学にいつそう興味を持ったなら、ほかの書籍や文献なども調べて、専門的な内容を深く勉強してほしい。

最後に、本書の執筆にあたり、コロナ社の皆様には多大なる御助力をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

2015年2月

著 者

# 目 次

## 第1章 環境と化学

1.1 環 境	1
1.1.1 「環境」の持つ曖昧さと多様性	1
1.1.2 自然環境と科学と化学	2
1.1.3 人間社会と環境	3
■コラム：「環境」に関する情報の注意点	3
1.2 人間と環境問題	4
1.2.1 地球と人類の歴史	4
1.2.2 環境問題の規模、現象、分野	5
1.2.3 環境問題の代表的パターン	6
1.2.4 原因物質の種類	7
1.3 化 学	8
1.3.1 現代の化学	8
1.3.2 物質の特性の例	9
1.4 元素と原子	9
1.4.1 元 素	9
1.4.2 原 子	10
1.4.3 原子の質量と原子量	10
1.4.4 アボガドロ定数と物質質量「モル」	10
1.4.5 元素の周期表	11
1.5 分子とモル質量	11
1.5.1 分子と分子式	11
1.5.2 分子量とモル質量	12
1.6 環境化学における「数値」の重要性	13
1.6.1 定性と定量	13
1.6.2 環境は「定量」が必要	14
1.6.3 環境に関する量とリスク	15

## 第2章 大気環境化学の基礎

2.1 「大気」とは	16
2.2 大気の状態を表す基礎的な量	17
2.2.1 気体とは	17
2.2.2 圧力・気圧	18
2.2.3 気温	20
2.2.4 気体の占める体積	21
2.2.5 気体の物質質量	21
2.3 気体の状態方程式	22
2.3.1 ボイルの法則	22
2.3.2 シャルルの法則	23
2.3.3 ボイル=シャルルの法則	23
2.3.4 理想気体の状態方程式	23
2.3.5 気体定数 $R$	24
2.3.6 質量との関係	25
2.3.7 理想気体と実在気体	26
2.4 気体成分の量の表し方	27
2.4.1 全圧と分圧	27
2.4.2 体積混合比	28
2.4.3 数密度	29
2.4.4 量の換算	30
2.4.5 重量密度	32
2.4.6 水蒸気の量	33
2.4.7 蒸発と蒸気圧曲線	34
2.5 典型的な大気の構造と組成	36
2.5.1 地球の大きさと大気の厚さ	36
2.5.2 典型的な気温・気圧の高度分布	37
2.5.3 地球大気の組成	39
2.6 大気微量成分の重要性	40
2.7 大気微量成分の挙動	40
2.7.1 発生源	41
2.7.2 輸送と拡散	42
2.7.3 反応と二次生成	42
2.7.4 沈着	43
2.7.5 数式化	43
2.8 大気成分の発生源と消失先と収支	45

	目	次	v
2.8.1	人為起源と自然起源	45	45
2.8.2	窒素 $N_2$	46	46
2.8.3	酸素 $O_2$	47	47
2.8.4	窒素酸化物 $NO_x$	47	47
2.9	気体分子の反応	48	48
2.9.1	反応速度式と数密度	49	49
2.9.2	一次反応	51	51
2.9.3	一次反応の時定数	51	51
2.9.4	二体反応（二次反応）の補足	52	52
2.9.5	擬一次反応	53	53
2.9.6	大気寿命	54	54
2.9.7	三体反応	55	55
2.9.8	数値計算	56	56
2.9.9	定常状態	59	59
2.9.10	反応に関する基礎事項の補足	60	60

## 第3章 光化学オキシダント問題

3.1	大気汚染の歴史	62	62
3.1.1	明治期の煙害	62	62
3.1.2	ロンドン型スモッグ	63	63
3.1.3	ロサンゼルス型スモッグ（光化学スモッグ）	63	63
3.1.4	日本での光化学スモッグ	64	64
3.1.5	光化学オキシダントと酸化還元	65	65
3.1.6	燃焼に伴う汚染物質の放出	68	68
3.1.7	その他の大気汚染	68	68
3.2	オゾンとは	69	69
3.3	大気光化学反応	70	70
3.3.1	大気化学反応と微量成分	71	71
3.3.2	分子の光解離とラジカル生成	71	71
3.3.3	「光」に関する補足	76	76
3.4	大気ラジカルと連鎖反応	77	77
3.4.1	大気ラジカルとは	77	77
3.4.2	大気ラジカルの生成・消失と存在量	79	79
3.4.3	OHラジカルと大気寿命	80	80
3.4.4	連鎖反応とは	83	83
3.5	対流圏オゾン生成のメカニズム	86	86
3.5.1	概略	86	86

3.5.2	前駆体の放出	87
3.5.3	VOC と OH の反応による RO <sub>2</sub> 生成	88
3.5.4	RO <sub>2</sub> と NO の反応	88
3.5.5	NO <sub>2</sub> の光解離	89
3.5.6	オゾン生成メカニズムの要約	89
3.5.7	オゾンの生成・消失の数式化	90
3.5.8	オゾン生成効率の支配要因	92
3.5.9	NO <sub>x</sub> , VOC とオゾン生成レジーム	94
3.5.10	メタンのオゾン生成メカニズム	97
3.5.11	CO のオゾン生成メカニズム	97
3.5.12	非メタン炭化水素 NMHC	98
3.5.13	地球規模での対流圏オゾンの収支	99
3.5.14	オゾンの日変化の例	100
3.6	光化学オキシダント対策	101
3.6.1	国内のオキシダント対策	102
3.6.2	オゾン生成効率を考慮した VOC の把握	104
3.7	最近の状況	106
3.7.1	国内の近況	106
3.7.2	近年のオキシダント増加に関連して	107
3.7.3	「減らないオキシダント」の解決のために	110
3.7.4	オゾン通年観測の例	111
3.8	光化学オキシダントのまとめ	113
3.9	略語・用語	114
■	コラム：NO <sub>x</sub> 反応系の復習と補足	115

## 第4章 大気とその周辺の環境問題の概略

4.1	成層圏オゾンの減少	116
4.1.1	鉛直分布	116
4.1.2	対流圏との状況の違い	117
4.1.3	反応メカニズム	118
4.1.4	オゾン全量とドブソンユニット	120
4.1.5	南極オゾンホール	120
4.1.6	CFCs	122
4.1.7	成層圏オゾン減少の対策	123
4.1.8	成層圏オゾンのまとめ	124
4.2	温室効果と気候変動	124
4.2.1	黒体放射	125

4.2.2 放射平衡	126
4.2.3 赤外吸収と温室効果	127
4.2.4 地球温暖化問題と人間活動	129
4.2.5 地球温暖化ポテンシャル GWP	129
4.2.6 IPCC 報告書	130
4.2.7 対策と将来予測	131
4.2.8 環境問題を複数の視点から考える	131
4.3 浮遊粒子状物質	132
4.3.1 基礎的な特性	133
4.3.2 浮遊粒子状物質の生成	135
4.3.3 PM <sub>2.5</sub> の問題	136
4.3.4 環境との関わり	137
4.4 室内空気の汚染	138
4.4.1 室内空気汚染の例	139
4.4.2 シックハウス症候群	140
4.4.3 室内空気汚染対策の考え方	140
4.5 酸性雨と水質	142
4.5.1 水圏環境と水質	142
4.5.2 酸性雨とは	143
4.5.3 広義の酸性雨	144
4.5.4 酸性雨の被害と監視	144
■コラム：受動喫煙と分煙	144

## 第5章 大気環境化学への理解を深める

5.1 大気環境化学の研究	146
5.2 大気環境の計測	147
5.2.1 大気観測の種類	147
5.2.2 大気観測の特徴	149
5.2.3 大気観測の考え方	149
5.2.4 分析とは	150
5.2.5 分析機器の校正	150
5.2.6 測定の時分解能	150
5.2.7 定量的なデータとの接し方	151
5.2.8 大気観測の準備と実施	151
5.3 曝露量とリスク	152
5.3.1 環境問題における有害物質への曝露のリスク	153
5.3.2 曝露量	153

5.3.3 有害物質の危険性	153
5.3.4 有害物質のリスクに関する補足	154
5.4 大気汚染への対応	155
5.4.1 環境基準と排出規制	155
5.4.2 除去・浄化のための技術の例	156
5.5 補足とまとめ	157
5.5.1 環境負荷とは	157
5.5.2 安全と安心	158
5.5.3 さ い ご に	158

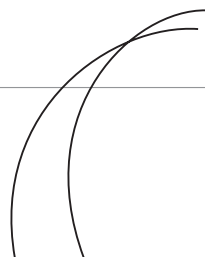
## 付 録

A.1 物理量と単位	159
A.2 SI単位系と単位換算	160
A.3 有効数字	161
A.4 数学の補足	162
A.5 二体反応の反応速度定数	167
A.6 数値計算 (2.9節の練習問題の解答例)	168
A.7 元素の周期表	169
A.8 大気環境関連の基礎データの例	169
A.9 後方流跡線解析による気塊起源の推定	171
A.10 ひとつこと～報告書や記事を書くときは～	172
引用・参考文献	174
索 引	176



# 第1章

## 環境と化学



日本の高度経済成長期における大気汚染と公害問題や、地球規模のオゾンホールや地球温暖化など、環境問題が叫ばれて久しくなりつつある。本書では、おもに大気環境に関する基礎的事項の説明を通して、環境問題を「化学」の視点から学ぶこととする。この章では、前提・基礎となる「環境」「人間と環境の関わり」「化学」の考え方を概説する。

### 1.1 環 境

最近「環境問題」「環境に良い」のようにさまざまな場面で「環境」という言葉を聞くようになった。読者諸氏も、「環境」と聞いてさまざまに思い浮かべるだろう。地球温暖化やオゾンホールなど「地球規模の環境」から、近所のゴミ捨て場や喫煙所の臭いなど「局所的な環境」まで、規模・スケールはさまざまである。こうした「物質の挙動」と関連する「環境」以外でも、「私の家の住環境は申し分ない」「職場の環境として理想的だ」「恵まれた教育環境だ」などと、人間関係・インフラ・社会的状況に関連する「環境」もある。また、企業の広告やマスコミの記事・報道でも「環境にやさしい」といった表現に触れることが多い。これらの例は、現代人の日常生活と「環境」の緊密さや「環境」に対する私たちの関心の高まりと同時に、「環境」や「環境問題」の多様性も示している。本書を読もうという読者諸氏は、「環境」に対する親近感や興味は顕著であろう。しかしながら、現段階で「環境問題とは何か？」を簡潔に説明できるだろうか。著者の講義を受講する学生の環境に対する関心は強いだろうが、いざ問われると必ずしも皆が自信を持って答えられない（それだけ「環境」という言葉が浸透して用いられ独り歩きしている、ともいえる）。そこで冗長かもしれないが、本書の導入として「環境とは何か」を整理しておこう。

#### 1.1.1 「環境」の持つ曖昧さと多様性

「環境」という単語を国語辞典で調べると、「人間や生物などの周囲を取り囲んでいる世界で、人間や生物などとの相互作用を及ぼしあうもの。また、その外界の状態。」といった趣旨が説明されている。「環境」という語は“周りの状況”を漠然と指し、さまざまに適用さ

## 2 1. 環境と化学

れうる。「環境」の持つ適用範囲の広さが、多様性や身近さにつながっている。逆に、「環境」といっても範囲が広すぎて、どんな状況や分野を指すのか、混乱を招くことも多い。例えば、「環境」に興味を持つ高校生が進路を検討する際、名称に「環境」が含まれる学科から選ぶとしよう。ところが、国内の大学の学科名で「環境」を含むものは多く、学科によって学べることも多様である。もともと化学や生物学の学科で近年「環境」を含む名称に変更した例は多いが、そのほかに建築系など工学系の学科や、人間社会に近いいわゆる文科系の学科もある。受験生は事前に、どのような「環境」に興味があるかを確認しつつ、該当する学科をよく調べなければならない。大学入学後に興味あることを学べない、という事態もありうる。また、「環境は最近流行っていてなんとなくカッコいい」「環境を謳えば企業や商品のイメージが良い」などと、具体的な内容を理解できなくとも、「環境」という語の持つ印象が独り歩きしてしまう場合もある。行動や考えの正当性を担保するために、「環境のため」「環境のことを考えている」といった理由付けが都合良くなされることもある。その逆に、正当な活動をして、「環境に良くない」など根拠の乏しい非難・中傷によってイメージ低下や風評被害を受けるおそれもある。情報を受け取って人に伝えるには、「環境」という語の多様性や曖昧さに惑わされず、該当する「環境」がどのようなものかを明確に把握しておくことが重要である。

本書で伝えたい「環境」を明確にするなら、「自然環境」のうち特に「大気」に関連する環境問題であり、「化学」の視点を中心に説明をする。取り扱う環境問題は、大気汚染のうち特に光化学オキシダント問題が中心だが、周辺領域として成層圏オゾン、地球温暖化、浮遊粒子状物質、室内環境、なども含む。大気環境化学のすべてを網羅できないが、本書の題材を通して興味を持つきっかけをつかんでもらえれば幸いである。

### 1.1.2 自然環境と科学と化学

環境問題の把握・解決のために、**自然環境** (environment) を対象として、おもに自然現象の解明を目指す自然科学 (science) の学問分野を**環境科学** (environmental science) という。自然科学とは、物質や物体や生体などの自然がどうなっているのか、現象がどう起こるのか、仕組みがどうなっているのか、どう説明できるのか、を明らかにする学問で、高校までの理科に相当すると考えてよい。ただし、ものの作り方や制御方法を開発・改善する技術 (technology) の分野も理科と関連する。厳密には科学と技術は区別すべきだが、一般的にはまとめて科学技術 (science and technology) と捉えられることが多い。

科学と化学は、日本語ではともにカガクと発音するため、しばしば混同されやすい。口頭で述べる場合、区別のために科学を「のぎへんのカガク」「サイエンス」などといい、化学は「バケガク」「ケミストリー」などということがある。パソコンなどで漢字変換機能を活

用する際には、誤字・誤用に注意したい。「大気」は主として、空気の運動（輸送・拡散など）や成分の化学反応など「自然の仕組み・現象」によって支配される。大気環境を研究する「大気科学」「大気環境科学」は自然科学の分野の一つである。大気科学や大気環境科学のうち特に化学（chemistry）の視点を中心として研究する分野を「大気化学」「大気環境化学」と呼ぶ。同様に、環境科学のうち化学の視点から環境を研究する分野を環境化学（environmental chemistry）という。

### 1.1.3 人間社会と環境

自然環境とは別に、人が生活するうえでの周囲の状況のように、人間を中心とする「社会的環境」も取沙汰される。教育環境、労働環境・職場環境、住環境、など多様な社会的環境がある。これらはおもに人間の活動や社会の仕組みによって状況が決まる。大気環境は自然の仕組みによって支配されるが、近年の人間活動の活発化以降は、大気中に放出される汚染物質も急増するなど、人間や社会からの影響が重大となっている。大気環境を知るには、自然の仕組みだけでなく人間活動や社会環境の影響も把握する必要がある。大気など環境が劣化すると人間社会も影響を被る。大気を含む自然環境は、自然だけでなく人間社会とも密接な関係にある。かといって、労働環境のような人間社会そのものと深く関連する「環境」の多くは、自然環境や大気環境とは深く関係しない。本書で取り扱う大気環境と特に密接な関係にあるのは、環境中への汚染物質の放出を決める人間活動や社会的環境（例：自動車排出ガスの状況）に限られる。

#### ■ コラム：「環境」に関する情報の注意点

「環境」に関しては、一般的には理解が浸透しているとはいえない。そのため、発信者に都合の良い情報をつなぎ合わせた世論の誘導も起こりやすい。別の環境問題との混同や、都合の良い部分の恣意的な抜粋によって、もっともらしい意見を述べるのである。思い込み・無知・先入観・固定観念による場合も含めて、「先に結論ありき」で都合の良い情報だけを示す、少ない事例や特殊な事象を普遍的かのようにセンセーショナルに強調する、のである。誤報やデマは、情報発信者が問題に詳しくない場合や能力が十分でない場合に多いが、発信者が何らかの意図を持って積極的に誤報を流す場合もある。誤った情報は、社会を混乱させるうえ、自分の無知や底の浅さや不勉強さをさらすことになる。インターネットが発達し情報伝達が高速化している社会では、得られる情報も玉石混淆である。身近な日常生活への影響の大きい「環境」の情報を発信する者は、情報や文面の妥当性を事前に慎重かつ十分に検証することが求められる。無論、あらゆる場面で情報や意見の正しさには、発信者が責任を持つべきである。専門家だけでなく、広く一般に情報を発信できる人には、自覚が求められる。また、情報を受け取る側も、複数の視点から比較検証するなどして、誤った情報を鵜呑みにしないよう心がけたい。

## 1.2 人間と環境問題

人間活動が許容範囲内なら、深刻な環境問題は起こらない。しかし、環境中に放出される物質などが増大して自然の許容範囲を超えると、環境問題が起こる。本節では、人間活動と自然環境や環境問題の全体像を確認しよう。

### 1.2.1 地球と人類の歴史

長い時間をかけて徐々に形成された地球の自然環境の歴史と人類の関連を眺めてみよう。

地球の誕生は約 46 億年前とされる。地球誕生からしばらく経過した原始大気には、二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が大量に含まれ、その温室効果によって大気は高温だったらしい。水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) は、大気中に気体として存在した水蒸気が凝結して液体の雨となって地表に降り注ぎ、海洋ができたという。その後、海中で生命が誕生し、水中で光合成をする植物プランクトンが現れると、酸素 ( $\text{O}_2$ ) が放出されて大気中の酸素濃度が上昇した。上空の「成層圏」と呼ばれる高度領域では酸素と太陽光によってオゾン ( $\text{O}_3$ ) が生成していった (オゾン層の形成)。生物に有害な波長の太陽紫外光はオゾン層によって吸収・低減される。生物が棲む地表に到達する紫外線強度は、オゾン層があることで低く保たれるようになり、陸上にも生物が現れるようになった。その後も生物は進化・多様化を続けて、特に約 6 億年前を過ぎた頃に大規模な生物の多様化が起こった。石炭などの化石燃料はこの頃から形成されたといわれる。1 億年前頃には恐竜が全盛期を迎えたが、その後絶滅した。こうした生物の進化・絶滅の歴史の中で、人類の祖先として約 6000 万年前に霊長類が現れた。人類の祖先は進化し、約 20 万年前に現在の人類 (ヒト, ホモ・サピエンス) が出現した。約 10 万年周期で氷期と間氷期を繰り返している。ヒトは、約 1 万年前から農耕を開始したと考えられている。それまでは狩猟採集など自然から得られる食料で暮らしていたが、農耕によって積極的に食料を確保するようになった。農耕によるヒトの生存可能性と生活安定性の向上に伴い、生活様式も変化したであろう。そして、紀元前 3000 年頃に文明が現れた。文明は、農耕や牧畜によって支えられていた。ヒトは文明の維持・拡大のために、森林伐採や過放牧・乱獲によって環境を破壊していった。文明の出現は人類による環境破壊の始まりといえる。人間活動に伴う環境破壊は、比較的小さい地域・規模に限られていたが、18 世紀に産業革命が始まると状況は一変した。大量生産や大量輸送が実現すると、近代化した国では食料やエネルギーを大量に消費し、人口は急増した。人々の暮らしは便利になり、物質的にも豊かになっていった。また、多くの人々や国々が、競って豊かさを追い求めるようになった。特に、20 世紀から 21 世紀にかけて、資源や商品の生産・輸送・消費や人の移動が地球規模で (グローバルに) 行

われ始め、現代は世界的な資源・エネルギーの大量消費時代となっている。1800年頃には10億人前後だった世界人口が、2010年代には70億人を突破したと推計され、200年あまりで約7倍になった。人間活動の急拡大に伴う資源の大量消費と廃棄物や排気ガスの大量排出は、自然環境の許容量を超える影響をもたらし、環境破壊の深刻化と広域化が問題となりつつある。

自然環境と人間の歴史を眺めると、「人類による地球環境の破壊とは、長年の自然現象によって形成した自然環境を、人類がごく短期間の活動で急激に変質させること」といえる。地球規模の環境に限らず、都道府県・市町村・町内会などの狭い規模の環境も含めて、不用意な行動や開発などによっていったん環境を破壊すると、元に戻すのに長い年月が必要な「後の祭り」となってしまう。環境問題の前例・知識・考え方を学ぶことで、今後の環境破壊を低減・予防できるだろう。

### 1.2.2 環境問題の規模、現象、分野

代表的な環境問題の「規模（スケール）」による分類例を図1.1に示す。規模とは、原因や影響のある空間的な範囲である。“地球規模（global scale）”では地球全体で問題となり、気候変動（地球温暖化）がこれに当てはまる。南極オゾンホールを含めた成層圏オゾンの減少は、南極に限らず地球全体への影響が懸念されている。次に大きい規模を“地域的（regional）”なスケールと呼び、おもに「国」が関係する程度の環境問題に相当する。酸性雨（酸性降下物）や光化学オキシダントは、国境を越えて周辺諸国にも影響を及ぼす（越境汚染）点でregionalな問題といえよう。最も狭い範囲を“局所的（local）”なスケールといい、幹線道路周辺（沿道）や工場地帯周辺など発生源近傍の大気汚染や室内空気が相当する。多種多様な環境問題があると同時に、規模（スケール）もさまざまである。

次に、「環境」と「学問の分野」の関連を述べておこう。自然環境を知るには、自然科学の各分野が必要である。例えば、自然環境中での物質の変化は化学の領分といえる。大気中

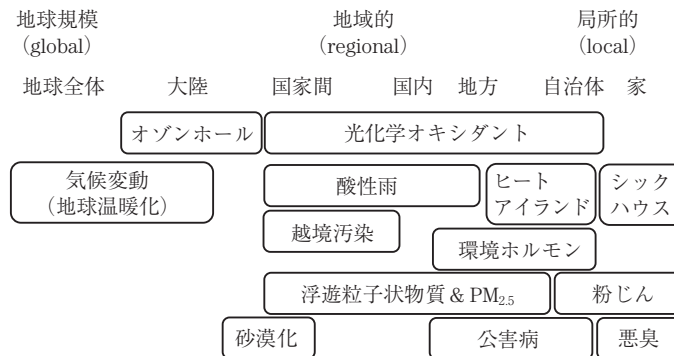


図1.1 環境問題の「規模（スケール）」による分類例

での物質の移動・循環は物理学の対象である。海・陸・火山など地形との関連は地学の知見である。生物との相互作用なら生物学が貢献する。重要なことは、現象ごとに単一の分野によって解決するわけではなく、複数の分野が関連することである。例えば大気成分の挙動を考える場合、反応は化学、風による輸送は気象学、海などの地形の寄与なら地学、動植物の呼吸に伴う大気中への放出なら生物学と関わる。さらに、人体や人間活動との相互作用を把握するには、自然科学（理科）以外の分野も重要である。ヒトへの健康影響は医学、産業からの汚染物質放出なら工学、経済活動との関連なら経済学、といった具合である。さまざまな分野にまたがった研究分野を学際的（interdisciplinary）といい、環境科学はまさに学際的な分野である。環境問題は種類や規模が多様だけでなく、個々の現象も複数の学問分野からアプローチする必要がある。古くからの学問や高校までの勉強のような特定分野からの一面的な見方では、環境問題は解決しない（☞<sup>†</sup> 4.2.8 項）。

### 1.2.3 環境問題の代表的パターン

環境問題の多くは、人間活動によって環境中に放出される原因物質が、自然現象のメカニズムに入り込むことによって、当初想定しなかった影響を人類や生物を含む環境に及ぼす、というパターンで起こる。自然はいつも人間に都合よく働くとは限らない。例えば、フロン類と呼ばれる物質の大気環境への放出が、上空の成層圏大気中の化学反応という自然のメカニズムを通してオゾンホールという環境問題をひき起こした（☞ 4.1 節）。また、地球温暖化問題は、人間活動に伴って濃度上昇する大気中の CO<sub>2</sub> などによる赤外線吸収で温室効果が増大して、気温が上昇する（☞ 4.2 節）。自動車排出ガスなどに含まれる窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）〔一酸化窒素（NO）、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）〕および揮発性有機化合物（VOC）という物質は、対流圏では光化学反応を通してオゾンを生成し、光化学オキシダント問題の原因となる（☞ 3 章）。環境問題の解決には、人間活動に伴う原因物質の放出状況や、自然の中での原因物質の挙動を把握したうえで、効果的で実現可能な対策を検討しなければならない。人間活動により環境が悪化すると結局、人間生活にも悪影響が及ぶ。

環境問題の原因と対策の特徴を補足しておこう。日本では高度経済成長期に**公害**が問題となった。環境問題を多くの人が意識していなかった時代では、「地球と比較して人間はちっぽけな存在で、大気を含む地球環境に物質を放出したところで、たいした影響はなかりょう、大丈夫だろう」と考えても無理からぬことである。慎重な人々が環境破壊の可能性を考えても、メカニズムが複雑な環境問題の場合、当時の知見から結果を想定するのは困難だったろう。そもそも経験のない問題のことは考えられないだろう。過去の公害への国や法による救

---

<sup>†</sup> 詳しくは、☞の先の項目で述べているので参照のこと。

済にも限界があるようだ。だからといって、汚染物質を大気中に垂れ流した結果として公害が頻発し、多くの被害者を生んだことを忘れてはならない。公害の発生は「想定できなかった」といわれても、被害を受けた人々はたまったものではない。現代は公害時代と異なり、すでにいくつもの環境問題を経験し、知見や技術が蓄積されている。こうした経験などをもとに、一定の予防や対策も可能なはずで、対策に消極的な人々は不作為とのそしりを受けよう。「公害」という語には、少数の特定の人による多量の放出だけでなく、不特定多数の人が皆で少しずつ原因物質を放出して不特定多数の人に害を及ぼした、というニュアンスも含まれる。多数の人や集団による影響は大きい。多くの人は、原因物質の排出や集団による影響に関して「悪気はない」「何が問題かを知らない」「そもそも気づいていない」であろう。公害を含む環境問題の対策としては、原因物質の放出量を段階的に皆で減らしていく必要がある。環境問題は、皆が少しずつ原因となっている場合が多く、国や企業や研究者など一部の人・組織だけで解決できる問題ではない。さらに、いつだれがどのように被害者の側に回るか分からない。広く多くの人々が正しい知識と高い意識を持って、できることから少しずつ取り組むことが重要であろう。また、日本国内だけの問題ではなく、世界の中の日本としての問題と自覚して、世界の人々と協調することも課題となろう。本書が、特に大気環境問題に関する基礎や考え方を広める一助となれば、また読者諸氏が新たな興味を持つきっかけとなれば、幸いである。

#### 1.2.4 原因物質の種類

環境問題において特に重要となるのは、原因物質の「種類」や「量」である。どんな成分がどの程度の濃度に達するとどう有害なのか、現状はどうなのか、を知ることが重要となる。感覚的には、人間活動に伴う環境中への有害成分の放出が限度を超えると問題が発生するだろうから、当該成分の放出量を減らせば環境問題は改善・解決できる、と思われるだろう。しかし、環境問題はそう単純なものばかりではない。環境に影響を及ぼす物質のパターンとして

① 人体などに直接有害な成分

② 大気に放出される成分の反応の結果「二次的に」生成する成分

がともに重要である。①の例として、二酸化硫黄 ( $\text{SO}_2$ ) による四日市ぜんそくが挙げられる。発生源の近くで  $\text{SO}_2$  が高濃度となって多くの人がぜんそくの症状を発した。このパターンでは、典型的には空気の輸送・拡散に伴って有害成分は希釈され、遠方までは問題とならない場合が多い。発生源からの放出量を減らせば、発症者数は減り、状況は改善される。一方で②の例として、光化学オキシダント問題が挙げられる。これは、放出された  $\text{NO}_x$  と  $\text{VOC}$  に太陽光が関与する光化学反応によって、オゾンが二次的に生成し、その濃度が上昇

することで起こる。こちらは大気が輸送されながらオゾンが生成する場合もあり、近傍だけでなく遠方にも影響しうる。また、光化学オキシダントの例では、NO<sub>x</sub> や VOC を単純に減らしてもオゾン生成は必ずしも抑制されない場合もある (☞ 3章)。なお、環境における物質の「量」の重要性は後述する (☞ 1.6節)。

## 1.3 化学

### 1.3.1 現代の化学

本書はおもに大気的环境について「化学」の視点から勉強する。読者諸氏は「化学」という言葉から何を思い浮かべるだろうか。例えば、中学や高校の化学で実験する「試験管の中で液体を混ぜると色が変わる」「反応により白い煙が出る」「酸性の水溶液にアルカリ性の水溶液を滴下して指示薬の色から pH を決める“中和滴定”」などだろうか。それとも、入学試験対策のために反応式や化学式を勉強したことだろうか。たしかに、「化学」の現象や特徴の一端・一面としては、そうしたものも含まれるだろう。“物質の変化”や周辺の事象を学ぶのが化学の代表的な側面である。しかし現代の化学はそれだけにとどまらず、「分子」を中心とした「物質」の挙動全般に関する広範囲の現象まで扱う。例えば「有機化学」とは、おもに炭素原子や水素原子からなる化合物「有機化合物」の合成・反応・活用をする分野で、石油化学工業、医薬品やバイオなどのライフサイエンス、そのほか現代生活に広く関わっている。「無機化学」は金属や非金属など「無機化合物」に関する分野で、錯体、触媒、材料、の領域も含まれる。「分析化学」では、化学的な視点・手法を活用した分析の研究を行っている。物質の量を正しく把握する「定量分析」はあらゆる分野で必要とされる。「物理化学」は、光や電磁波などの物理的現象と物質・分子との相互作用を利用して、物質の挙動を分子レベルで把握する分野である。これら化学の分野に共通するのは「原子」「分子」といった単位（ナノメートル＝十億分の一メートルのレベル）で、物質の性質や現象を把握し、その特性をわれわれの生活に役立てることを目指す点である。そのうち、分子レベルで起こる「化学反応」として「物質の変化」を探求するのは、特に「化学的」といえる。

さらに近年は、旧来の有機化学、無機化学、物理化学、などのほかのさまざまな分野との複合や応用が求められている。例えば、生物学が扱ってきた生物や生体も、物質としてつき詰めれば「分子の集まり」であり、生物を分子の視点から扱えば化学の研究である。また、「分子」そのものを物理法則に従う物体と考えれば、物理学と化学を組み合わせることになる。多様な分野との連携が現代化学の特徴である。複数分野にまたがる学際的な学問領域を「境界領域」「複合領域」と呼ぶ。環境問題は、人間活動に伴って環境中に放出される物質が原因となり、問題解決にはまず原因物質の挙動を詳しく知る必要がある。原因物質の分子レ



# 索 引

<b>【あ】</b>		<b>【け】</b>
圧 力 18	活性化エネルギー 53	経気道曝露 137
アボガドロ定数 10	換気回数 142	経口曝露 153
アルベド 126	環境科学 2	計 測 150
アレニウスの式 53	環境化学 3	系統誤差 150
<b>【い】</b>	環境基準 65, 155	経皮曝露 153
閾 値 154	環境基本法 65	原 子 10
一次反応 51	環境省大気汚染物質広域 監視システム 103	検出下限 150
一次放出物 42	環境たばこ煙 144	検出限界 150
移動発生源 87	環境負荷 157	原子量 10
<b>【う】</b>	環境リスク 15, 153	元 素 9
ウィーン条約 122	還元剤 66	元素記号 9
ウィーンの変位則 126	乾性沈着 43	元素の周期表 11
<b>【え】</b>	感 度 150	検量線 150
エアロゾル 132	<b>【き】</b>	<b>【こ】</b>
越境大気汚染 109	気 圧 18	公 害 6
<b>【お】</b>	擬一次反応 54	公害対策基本法 65
オキシダント 65	気液平衡 35	光解離 51, 74
オゾン 69	気 温 20	光解離係数 51
オゾン生成能 104	危険性 153	光化学オキシダント 64
オゾン生成レジーム 97	気候変動 124	光化学オキシダント問題 64
オゾン全量 120	気候変動に関する 政府間パネル 130	光化学スモッグ 64
オゾン層保護法 122	揮発性有機化合物 86	光化学反応 64, 70
オゾンゾンデ 148	基本単位 160	校 正 150
オゾン破壊係数 123	吸収スペクトル 73	後方流跡線解析 171
オゾンホール 120	吸収断面積 73	黒 体 125
温室効果 127	急性影響 140, 153	黒体放射 125
温室効果気体 125, 127	急性毒性 153	誤 差 161
温 度 20	京都議定書 125	固定発生源 87
<b>【か】</b>	共便益 114	混合試料 149
化学反応式 49	極域成層圏雲 121	<b>【さ】</b>
拡 散 42	極 限 58	差分法 57
確 度 150	<b>【く】</b>	酸 化 65
化合物 66	空 気 16	酸化剤 66
化石燃料の燃焼 47	偶然誤差 150	酸化数 66
	組立単位 160	酸性雨 142
	クロロフルオロカーボン類 119	酸性降下物 143
		三体反応 50, 55

【し】

紫外吸光法	67
紫外光	76
時間分解能	101, 150
しきい値	154
時系列データ	101
自然環境	2
自然起源	45
シックハウス症候群	139
実在気体	26
湿性沈着	43
実大気観測	146
室内実験	146
質量保存則	44
シャルルの法則	23
重量密度	32
受動喫煙	145
蒸気圧	35
蒸気圧曲線	35
消失先	41
衝突頻度	49
正味の反応式	50
触媒	138
触媒反応サイクル	119
人為起源	45

【す】

水圏環境	142
数値	159
数値計算のステップ	60
数密度	29
ステファン・ボルツマン定数	126
スペクトル	77
スモッグ	63

【せ】

生成物	42, 49
成層圏	38
精度	150
製品安全データシート	154
赤外光	76
摂氏温度	20
絶対温度	20
接頭辞	160
全圧	27
前駆体	86
全炭化水素	98

【そ】

相対湿度	33
組成	149
素反応	50, 55, 60, 83
そらまめ君	103

【た】

大気	16
大気汚染	62
大気汚染防止法	65
大気環境化学	3
大気圏	16
大気光化学反応	70
大気寿命	54, 81
第三体	55
体積	21
体積混合比	28
代替フロン	123
太陽定数	126
太陽放射	125
対流圏	38
単位	159
単位系	160
短寿命種	82
短寿命成分	82
単色光	77
単体	66

【ち】

地球温暖化	124
地球温暖化ポテンシャル	129
地球温暖化問題	129
窒素酸化物	86
チャップマンメカニズム	118
長寿命種	82
長寿命成分	82
貯留成分	48
沈着	43

【て】

定常状態	59, 80
定性的	14
定性分析	14, 150
定量的	14
定量分析	14, 150

【と】

等高線図	94
同素体	69
ドブソンユニット	120
ドルトンの法則	27

【な】

ナイトレートラジカル	54
------------	----

【に】

二次生成	43
二次生成物	43
二次反応	53
二次有機エアロゾル	136
二体反応	49
日変化	100

【ね】

熱力学温度	20
-------	----

【は】

排煙脱硝	156
バイオマス燃焼	47
排出規制	156
ハイドロクロロ フルオロカーボン	124
曝露量	138, 153
バックグラウンド大気	45
バックグラウンド濃度	54
発生源	41
反応	48
反応系	55
反応速度	49
反応速度式	50
反応速度定数	50
反応の時定数	52
反応物	42, 49
半反応式	66

【ひ】

非メタン炭化水素	98
標準ガス	147

【ふ】

ファンデルワールスの状態式	26
フィードバック	46
不均一反応	138

不対電子	78	放射平衡	126	ラジカル反応性	105
物質量	11, 21	暴走温室効果	128	ラジカル連鎖反応	83
物理量	159	飽和蒸気圧	33, 35		
浮遊粒子状物質	132	ポテンシャルオゾン	108		
フラックス	72			<b>【り】</b>	
フリーラジカル	78			理想気体	22
分 圧	27	<b>【ま】</b>		律速段階	55, 61, 85
分 子	11	慢性影響	140, 154	立体角	73
分子数	21	慢性毒性	154	粒 径	132
分子量	12			量	159
分 析	14, 150	<b>【も】</b>		量子収率	74
		モデル計算	146		
<b>【へ】</b>		モ ル	11, 21	<b>【れ】</b>	
平均滞留時間	143	モル質量	12	励起状態	73
平均モル質量	31	モル分率	27	連鎖長	85
平衡状態	55	モンテリオール議定書	122	連鎖反応	60, 83
ペルオキシアセチルナイトレート	48			連続の方程式	44
		<b>【ゆ】</b>			
<b>【ほ】</b>		有効数字	161	<b>【ろ】</b>	
ボイル=シャルルの法則	23			ロサンゼルス型スモッグ	63
ボイルの法則	22	<b>【よ】</b>		ロンドン煙害	63
放射強制力	129	ヨウ化カリウム法	67	ロンドン型スモッグ	63
放射フラックス	72				
		<b>【ら】</b>			
		ラジカル	71		

	<b>【B】</b>		<b>【I】</b>	PM <sub>2.5</sub>	136
BVOC	88	IPCC	130	PO	108
	<b>【C】</b>		<b>【M】</b>	PSC	121
CFCs	120	MIR	104	<b>【Q】</b>	
	<b>【D】</b>	MSDS	154	quantity calculus	160
DU	120		<b>【N】</b>	<b>【S】</b>	
	<b>【F】</b>	NMHCs	98	SI 接頭辞	160
fuel NOx	47	NO <sub>3</sub>	54	SI 単位系	160
	<b>【G】</b>	NOx	47, 86	<b>【T】</b>	
GWP	129	NOx 律速	95	thermal NOx	47
	<b>【H】</b>		<b>【O】</b>	<b>【V】</b>	
HCFCs	124	ODP	123	VOC	86
		OH ラジカル	54, 78	VOC 律速	96
		<b>【P】</b>			
		PAN	48		

— 著者略歴 —

- 1996年 東京大学理学部化学科卒業  
2001年 東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了  
博士（理学）  
2008年 首都大学東京戦略研究センター准教授  
2012年 早稲田大学人間科学学術院准教授  
2015年 早稲田大学人間科学学術院教授  
現在に至る

はじめての大気環境化学

First Step in Studying Atmospheric and Environmental Chemistry

© Jun Matsumoto 2015

2015年4月30日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 松本 淳  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06636-4

(松岡) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします