総 説

化学物質がもたらした大気環境の混乱と秩序の回復

Ⅱ. 21世紀初頭の大気汚染の課題と視点

玉 置 元 則*

1. はじめに

現在の公害問題の出発点は約200年前の英国から始まった産業革命に遡るのであろうが、日本での大気汚染を含めた公害問題が社会的関心と呼ぶようになったのは50年ほど前のことである。昭和30年代から顕著になりだした公害問題は昭和45年(1960年)の「公害国会」で、昭和42年に成立した公害対策基本法の第1条2項の「経済の健全な発展との調和を保ちつつ、生活環境を保全する」とのいわゆる「調和条項」が削除された。そして、大気汚染防止法が制定され、大気汚染に係る環境基準が設定されていった。昭和46年7月の環境庁設置に伴い発行された環境白書では「環境問題は、今や爆発的な様相を呈してきた」との有名な書き出しで始まっている。この昭和42年の公害対策基本法の成立から数年の動きは、従来の対応から考えると、まさに驚くべき変化であり、「これは昭和40年代初頭までの余りにも理不尽な汚染者の天国時代に対する反動ともいうべき性格を持っていたことも否定できない」(橋本道夫氏、環境研究, 1987)のものであった。

今、21世紀に入り、この世紀初頭の大気汚染を考える出発点は、過去50年の公害問題を整理するなかで見えてきた¹⁾。20世紀後半のようなスピードでの大量生産・大量消費では21世紀を乗り切ることができないのは明白である²⁾。このことを前提にした当面の課題とその視点は、20世紀からの積み残し事項である「酸性雨」、「温暖化」、「オゾン層破壊」と「ダイオキシン・環境ホルモン」に加えて、「汚染物質の循環過程での大気圏の位置付け」、「物質の化学的特性の把握」、「低濃度慢性曝露」および「エネルギー転換」を考えることからスタートする。キー

ワードは「バランスの回復」である。

2. 物質循環過程における大気圏の位置付け

大気汚染は、人間活動によって大気中にもたらされた汚染物質によって大気圏に生存する人や動植物あるいは物質表面や文化財に直接的あるいは間接的に被害をもたらす現象である。とりわけ人類に対しては呼吸作用によって空気を体内に取込んだ時に、その空気に含まれているガスや粒子が気管支や肺胞に到着し種々の疾患を引き起こす。例えば二酸化窒素(NO_2)はそのままあるいは硝酸(HNO_3)、亜硝酸(HNO_2)および硝酸有機化合物(PANなど)に変化して体内に吸入され、感染性の呼吸器疾患への罹病性を増加させるなどの作用を引き起こす。植物に対しての影響は組織の損傷、バイオマス生成の変化、二次的ストレス要因への感受性の増強などであるが、これは葉からの直接摂取以外に土壌からの取込みが大きい。

さらに HNO_3 を介在する酸性雨でも、土壌と水圏の酸性化や窒素過多をもたらす。沈着した窒素は土壌の酸性度を増加し栄養素を供給するなど、土壌の化学的性状を変化させるものであるが、さらに硝酸塩などは表層水や地下水へも浸出していく(図-1)。

一方、水質汚濁は水の中に排出された汚染物質を人が口から摂取することなどによって起きる。ゴミ焼却炉からのダイオキシンは空気から人体に摂取されるのではなく、一旦土壌に落下したり水に含まれたりして、水や食物を経由しつつ最終的には人に摂取される。こう見てくると、大気汚染の定義がどうしても曖昧にならざるをえない。汚染物質が大気中に排出されても、水圏、土壌あるいは生物を経由して人に影響を与えるパターンが増加している。したがって、汚染物質が環境全体のなかでどのような循環過程をとっているのかを明確にする必要がある。

*兵庫県立公害研究所
Motonori TAMAKI

図-1 環境中での窒素サイクルの概要

金属は化学的形態や酸化数の状態によって毒性は異なるが、金属そのものがなくなることはない。それに対して、NO₂は、窒素(N₂)やアンモニア(NH₃)などに姿を変える。もちろん、この際も、NもOもなくなるわけではないけれども、その挙動は金属とはまったく異なる。したがって、NやSを中心として大気汚染を見る場合は、大気圏内の挙動だけではなく、循環系のなかでどのように変化して浄化されているかについて着目することが肝要である。

3. 遷移金属の化学

—dブロック元素の結合の多様さ—

すべての物質は100幾つかの元素の組合せで成り立っている(図-2)。

人にとっての毒物の定義はむつかしいし、なぜ毒

物なのかは必ずしも明確ではない。人の体内に存在しないかごく微量しか存在しない金属、ハロゲンあるいはベンゼン環が体内に侵入すると拒否反応を示すようである。しかし、後述のように^{3,4)}、人体にはすべての元素が存在し、かつその多くが人体に必要なかもしれない、要は量(バランス)の問題である。元素が存在しないということと、微量で検出できないこととは大きな違いである。

金属で古くから毒性が明らかになっているのは、砒素(As)とか水銀(Hg)などである。しかし、その毒性は量と化学的形態によって異なり、通常の状態では毒性をほとんど示さなかったり、薬として使用されたりして文明の発展に寄与してきた例も多い。例えば砒素化合物である亜砒酸(As₂O₃)は「石見銀山」として鼠捕りに用いられてきたし、現在で

	s-ブロック		d-ブロック(遷移金属)										p-ブロック						
周期	アルカリ	アルカリ土															ハロゲン	希ガス	
	I	II											III	IV	V	VI	VII	0	
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pd	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac																

f-ブロック:ランタノイド、アクチノイドを除く

図-2 周期表

はガリウム砒素半導体として先端産業を支えている。

一方、水銀は「丹」(赤色)として薬の代名詞のように使われ、「赤チン」として殺菌用に用いられてきたし、農薬としても威力を発揮してきた。また、家庭用では体温計に用いられているし、化学分析ではポーラログラフィーで多量に使用されてきた。また、圧力を測定するマノメータにも不可欠であった。さらに環境中の塩化物イオン (Cl^-) や二酸化硫黄 (SO_2) を測定するにもチオシアン酸第二水銀法やウエストゲイク法として低濃度域に感度のいい方法として珍重されてきた。分析化学者にはきわめて身近な水銀であっても、一度それを床にこぼすと大変である。銅板と酸の入ったビーカーを持ち歩き、1粒ずつ水銀を拾い集める作業(アマルガム:水銀の合金として回収)を1日中続ける必要がある。床面に広がり表面積が増大し気化して、その部屋に住めなくなるからである。この作業は砂金を採取するのに水銀をばら撒いて金とのアマルガムを作り、最後に熱処理して金を手に入れる手法と類似である。

しかし、これは金属単体やイオンの形をした無機の水銀の話である。水俣病が示したことは、水銀が魚などの体内で濃縮され炭素(C)と結合して有機水銀(メチル水銀)に変化すると体内から代謝されにくくなり、手足のしびれと知覚異常、聴力障害や運動障害などを引き起こすということである。

富山県神通川流域で問題になったイタイイタイ病はカドミウム(Cd)に原因しており、兵庫県・生野銀山周辺等ではカドミウム米が問題になったこともある。

それでは金属とは何であろうか。金属は周期表(図-2)ではホウ素(B)とアスタチン(At)を結ぶ線の左下方に位置し、元素の2/3を占める。金属光沢を有し、展性・延性に富み、電気と熱の伝導性の著しい単体および合金である。とりわけ問題に

なる重金属は密度の大きい金属($4 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上)、化学的にはSc以外の遷移金属で、第4周期以下のp-ブロック元素の金属である。

周期表でs-ブロックの元素は典型的なイオン化合物を作る非常に反応性の高い金属元素の集団であり、p-ブロックは主に共有結合を作る元素の集団であるが、d-ブロックはその中間に位置しており、遷移元素と呼ばれ、すべて金属で電気および熱の良導体である。これらの金属は延性があり他の金属と合金を作り、反応性にとぼしい傾向があるが、その多く(ならびにその化合物)は触媒作用を持ったり、錯体形成能力が大きい⁵⁾。

なお、イオン化合物は電荷を持ち結合力は比較的弱いものに対して、共有結合を持つ物質は二つの原子が電子を共有して結合するため、結合力が強い。錯体ではお互いに電子を出し合うのではなく、一方の原子のみから電子対をもらって成り立つ配位結合を含む物質であり、通常もう一方は金属原子である。

また、遷移金属は種々の酸化数をとる傾向がある。例えばクロム(Cr)の場合は(+I)～(+VI)まで、マンガン(Mn)の場合は(+II)～(+VI)まで変化する。これらの性質により、触媒利用では種々の生産工程を経て大気や水中に放出される機会が増えるとともに、生物に対しても怪しげな作用をする可能性がある。

ポルフィリン環を含む化合物は人と植物の関係において重要な役割を果たしている³⁾(図-3)。このような錯体としてはFe(II)の造血作用の結果作られるヘモグロビンならびに有害な過酸化水素を分解する酵素であるカタラーゼやCo(II)の造血作用に関与するビタミンB₁₂があり、遷移金属ではないが、Mg(II)が関連するものとしては植物の光合成に使われる葉緑素・クロロフィルがある。動物の活動に必要な酵素の合成から血液合成に必要なビ

図-3 人と植物に関係するポルフィリン環を含む化合物の例

(A) ポルフィリン環, (B) ヘモグロビンの骨格部分 (本図はプロトヘミンの平面部分), (C) ビタミン B₁₂ の骨格部分, (D) クロロフィル C

タミン B₁₂ の合成までは植物が担当し, その利用と後始末は Fe 錯体が担当している³⁾. そしてこのことは, この種の金属量の増減が生物の活動をコントロールしたり妨害したりすることになる. 例えば Mg に対するマンガン (Mn) のように, 大きさがほぼ同じか化学的・物理的性質が類似の金属は, 本来の金属の位置に取って代わる可能性がある.

また, クロムは (VI) で毒性が強い. これを大量に摂取すると嘔吐, 腹痛, けいれんなどを起こし, 皮膚に触れると皮膚炎や浮腫などが起きる. ところが Cr (III) ではそのような影響は見られない. こ

酸化数	化合物	
5	V	HNO ₃
4	IV	NO ₂
3	III	HNO ₂
2	II	NO
1	I	N ₂ O
0	0	N ₂
-1	-I	NH ₂ OH
-2	-II	N ₂ H ₄
-3	-III	NH ₃

図-4 窒素化合物の酸化数

の違いの理由は明確ではないが, 体内への取込み, とりわけ細胞膜の透過と関係があるかもしれない. それも間違えて取込んでしまうような. これは, 無機水銀 (Hg, Hg²⁺) と有機水銀 (Hg-C) との関係でも類似と思われる.

一方, 環境ホルモンとしての遷移金属の役割は大きいと予想されるが, 現在のところ, 鉛 (Pb), カドミウム (Cd) と水銀がリストアップされているにすぎない. 平成12年3月に環境庁大気保全局は種々の機関に委託して健康リスクを評価している. 例えば, ニッケルについては報告書が出されており⁶⁾, 発ガン性, 急性毒性や慢性毒性などについての知見がまとめられている.

4. 窒素の化学 —生物にとって不可欠の元素かそれとも有害な元素か?—

窒素は非常に広範囲の酸化状態をとる. 図-4に示すように, アンモニア (NH₃) の (-III) から窒素 (N₂) の (0), さらには硝酸 (HNO₃) の (+V) までをとる. アミノ酸はアミノ基 (-NH₂) とカルボキシル基 (-COOH) の両者を同一分子内に持つ有機化合物であり, この重縮合したペプチド結合を有する物質がたんぱく質で生体構成中もっとも重要なものと考えられている. 多くのアミノ酸は体内で合成され, 体内の窒素平衡が保たれるが, 10種足らずのアミノ酸は必須アミノ酸として外部から食物として摂取する必要がある.

また, 窒素は植物の葉の生育に不可欠であり, 硝酸アンモン (NH₄NO₃) や硫酸アンモン ((NH₄)₂SO₄) のような窒素化合物は肥料としての役割が大きい. 植物は空気中にある大量の窒素 (N₂) を利用できないが, 土壌中には空気中の窒素を化合物の形に変換できる根粒菌のようなバクテリアがいるため, 根から硝酸塩やアンモニア塩として吸収できる. 窒素肥

料はこれを補うものであり、19世紀には主に硝石から製造していた。

しかし、20世紀に入り、人類はこの空中窒素の固定法として、アンモニアを合成するハーバー法 ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$) を手に入れた。この NH_3 を原料として、硝酸や尿素を経由した多様な化学物質を製造してきた。アミド結合 ($-\text{CO}-\text{NH}-$) を持つナイロンの合成に代表されるように、窒素を用いた有機合成は文明進歩に大いに役立ってきた。

このように窒素は人類とすべての生物にとって不可欠の元素と考えられていたにもかかわらず、近年窒素酸化物 (NO_x : $\text{NO} + \text{NO}_2$) が人為的に多量空气中に持ちこまれるようになったため、その評価が若干怪しいものになってきた。 NO_x からの大気中での変化物である HNO_3 や HNO_2 ならびに NH_3 も、またさらに変化した粒子状物質も大気汚染物質と考えられている。

亜酸化窒素 (N_2O) も地球温暖化とオゾン層破壊に責任があるとされている。また、光化学スモッグの生成物である有機過酸化物の代表的なものは硝酸パーオキシアシル (PAN) で、これはオゾンよりさらに有害な物質である。それ以外にも大気中では少ないが N-ニトロソアミンは発ガン性があるとされている。また、青酸化合物 ($-\text{CN}$) は窒素系の化合物であり、リン (P) は化学的には N と兄弟の元素である。

窒素は生物にとって不可欠の元素であることは言うまでもない。しかし、「人類にとって有害な元素か」と提起されざるをえないほど多様な窒素化合物による有害性が指摘されている。このほとんどは NO_x をその起源としているため、 NO を人為的に生成して大気中に放出した時点でパンドラの箱の蓋は開いてしまう。すべては NO_x 低減化対策にかかっている。

5. 塩素の化学

—海から大気へ、そして人体へ—

フッ素 (F)、塩素 (Cl)、臭素 (Br) およびヨウ素 (I) はハロゲン元素として非常によく似た性質を持つグループである。米国 GE のミッジリーが新たな冷媒の合成を目指したとき、周期表の一番右上隅にあるフッ素に目をつけた。フッ素と炭素との結合エネルギーが極めて大きく、電気陰性度がもっとも高いことから、安定で不燃性で無害の化合物が得

られると予想した⁷⁾。このハロゲンに目をつけたのはすばらしい着想であり、いわゆるフロンがこの世に誕生した。

ハロゲンのなかで、もっとも一般的な元素は塩素である。海水中の主成分である塩化ナトリウム (NaCl : 食塩の主成分) はよく知られた物質の一つである。この塩水 (NaCl) の電気分解により塩素ガス (Cl_2) は製造される。 Cl_2 は塩化水素 (HCl) からもディコン反応で製造される。

Cl_2 は酸化剤、漂白剤、殺菌剤あるいは毒ガスとして使用されてきた。 Cl_2 を原料として塩化ビニル系樹脂、四塩化炭素、クロロホルムなどの塩素系溶剤、さらし粉などの次亜塩素酸塩が製造されている。

それ以外にも塩素がくっついた有機物質 ($\text{Cl}-\text{C}$ 結合を持つ) として DDT や BHC が殺虫剤として使用されてきた。ベンゼン (C_6H_6) の塩素化により塩化ベンゼンが製造される。さらに複雑な化学反応を経て、いわゆるダイオキシンであるポリ塩化ジベンゾ-p-ジオキシン (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs) およびコプラナー PCB が製造される。ベトナム戦争で米軍が枯れ葉剤として使用した 2,4,5-T 製造の副産物としてダイオキシンが生成された。ゴミ焼却炉からのダイオキシンはゴミ中の、あるいは燃焼過程で生成した塩素源 (HCl や Cl_2 、塩化ビニル) に起因している。いずれも非意図的生産である。後者ではそれ以外にベンゼン環を持つ化合物と鉄 (Fe) や銅 (Cu) などの触媒になりうる金属ならびに適度な燃焼温度が反応条件となっているようである。

海中にあった Cl^- は生物にやさしく、体内に過剰に吸収されても体外へ代謝されていく。しかし、炭素と結合し強い $\text{C}-\text{Cl}$ 結合を持ったが最後、強力なパワーを発揮する。そしてベンゼン環のような平面構造を持つ物質と出会うと体内の奥深くまで侵入し種々の障害を引き起こす。化学物質の持っている利便性とその毒性、正に両刃の剣の恐ろしさを見せつけられた今⁸⁾、リスクをいかに小さくするかを選択が求められている。

表1 大気汚染物質の濃度を示す単位

表示	数値	名称・記号	適用
%	10^{-2}		O ₂ , N ₂
m	10^{-3}	ミリ (m)	(CO, CO ₂)
ppm	10^{-6}	マイクロ (μ)	N ₂ O
ppb	10^{-9}	ナノ (n)	SO ₂ , NO _x , O ₃
ppt	10^{-12}	ピコ (p)	ダイオキシン(発生源)
ppq	10^{-15}	フェムト (f)	ダイオキシン(血中)

6. 低濃度慢性曝露 —見えざる敵との戦い—

当初の大気汚染は発生源周辺で影響がでる「地域汚染」であり、希釈される以前の高濃度による影響が多かった。したがって、大気汚染で用いられる単位は当初はppmであったが(表1)、その後SO₂もNO_xもO₃も低濃度になり、単位としてもppbが使用されるようになった。最近の化学物質ではppt、さらにそれ以下の単位も使用されるようになってきた。これは浄化とは別の話であり、こんな低濃度でも被害をもたらしかねないことを示している。

高濃度の汚染物質による急性の疾患に比べて低濃度の汚染物質に長期間曝露されたときに出現する慢性的病状の判定は難しい。例えば、人はNO₂に慢性的に曝露されている。動物実験では形態学的な手法や形態統計学的な手法が取られてきており、その結果、肺の構造やそれに関連する機能に種々の変化を示しているが、その影響の程度は必ずしも明確でない⁹⁾。

都市部を中心とした深刻な大気汚染は人に対する被害が主であったが、光化学スモッグにおけるオゾン生成は人以外にも生態系への影響が大きい。1970年代の光化学スモッグは人体影響が強烈であったため、同時に起きた農作物被害については軽く見られがちであった。しかし、事態が落ち着いた今、あらためて農作物の収量低下を含めた植物影響、さらには森林枯損に対する光化学スモッグの寄与が指摘されだした¹⁰⁾。このような点に重心が移ると、O₃などによる低濃度慢性曝露が大きな比重を占めることになる。

従来、日本では大気環境中のNO_xを吸光光度法であるザルツマン法(基本はNO₂測定)で測定していた。しかし、この方法は妨害物の存在、NOの酸化効率ならびに溶液中濃度から大気中濃度への変換係数などに問題があり、欧米と同じ化学発光法(基本はNO測定)に順次置きかえられるようになってきた。化学発光法は都市大気の測定では何ら問題が

ないように見えたが、清浄地域ではNO₂測定に対する妨害物の除去が難しいことがわかってきた。したがって、多くの汚染物質に対する低濃度域に信頼性ある測定法の開発が必要である。また、一方では動物実験を主体にした低濃度域に信頼性のある汚染物質—影響関係のデータ蓄積が求められる。

大気汚染物質はもともと個々の物質について測定が行われ個々の物質に対する評価が行われてきた。しかし、これ以外に総合的・指標的な測定を行うことができれば低濃度汚染物質の総合的評価にもつながる。これには物理・化学的な測定法の使用が基本ではあるが、植物指標とか、さらには「動物指標」のようなものも利用できれば評価法の幅が広がる。

7. ガスからの粒子とガスのような粒子

1970年代の光化学スモッグ多発時とは明らかに状況は違う。しかし、この数年光化学スモッグは静かに復権しつつある。先進国のなかで光化学スモッグを忘れ去ったのは日本だけである¹⁰⁾。秋元によれば、東アジア地域では経済発展に伴う燃料使用量の増大によりNO_xや炭化水素の排出量が増加し、大陸規模でO₃が増加し、風下側の日本ではバックグラウンドオゾン濃度が増加していると指摘している¹⁰⁾。

大気の常時監視局は都市部に厚く配置され、それも都市の中心部に設置されているため、そのデータのみでの解析では、日本海沿岸地域でO₃が増加していることを明確に示すことは困難であるが、この地域に焦点を絞った種々の調査研究が進みつつあるため、少しずつその実態が明確になるものと期待される。

光化学スモッグの行政的な評価は光化学反応を考慮し、対策を重視した被害発生を抑制を基本にして行われるため、他のNO_xやSO₂と少し異なる点がある。オゾン濃度は夜には低下するため、環境基準では「1時間値が0.06ppm以下であること」で終わり、「1時間値の1日平均値——」のくだりは含まれない。また、予報や注意報が年間何回発令されたかが評価の基準ともなる。しかし最近のオキシダント(O₃+有機過酸化化物など)の挙動は少し変である。従来、日没になると急激に濃度が低下したものが、夜に入ってもなかなか濃度が下がらないことがある。この「少し変」であるかどうかを明らかにするためには、オキシダントについて次のような視点からの検討が必要と思われる。①予報や注意報発令回数とは別に、都市大気中で濃度が増加していない

図－5 主要なエネルギー資源の確認可採埋蔵量

(出典：環境庁，平成12年環境白書，Oil & Gas journal，世界エネルギー会議資料，OECD/NEA-IAEA「URANIUM'97」，石油，天然ガス：1998年1月，石炭：1993年末，ウラン：1997年1月)

か、②背後地域とりわけ日本海沿岸地域で濃度が増加していないか、③夕方に濃度が下がりにくくなっているか、夜間の濃度が増加していないか、④オキシダントとオゾンとの間の関係は従来と同じか、などである。

光化学スモッグで重要なことは、このオゾンなどのガス状物質生成とともに、有害な粒子状物質である硫酸塩 (SO_4^{2-})、硝酸塩 (NO_3^-) ならびに有機性化合物の生成である。これらの物質はきわめて微小であり、人ならびに動植物に種々の悪影響を与える。

また、主にディーゼル排ガスに含まれるとされている微粒子はPM2.5問題として重要である。燃焼や大気中の化学反応で生成される細かい粒子は、大気中では重力によっては沈降せずガスと同じような挙動をし、大気中で長時間存在するとともに、人体に吸入されると肺胞まで到達する。

日本でも再度光化学反応による生成物の重要性、とりわけ広域的な低濃度慢性曝露による生物全体への影響を注視する必要がある。それと同じにガスのような挙動をする微小粒子への対策がより重要となっている。

8. エネルギー変換と大気汚染

天然ガスでも同様ではあるが、石油の埋蔵量

図－6 世界のエネルギー消費の推移と見通し(資源別)
(出典：環境庁，平成12年環境白書，OECD/IEA「WORLD ENERGY OUTLOOK 1996 EDITION」)

(図－5)を考えると、今世紀では20世紀と同じベースでの石油の使用は制限を受けざるを得ない(図－6)。このとき、文明の享受をある程度制限した低成長へと価値観を根本的に変えるのか²⁾、または別のエネルギー利用を考えるのかの分岐点に人類は早晚立たされる。現実には両者とも採用せざるを得なくなるのだが、後者の道については、風力、太陽光や太陽熱のようなクリーンエネルギーの利用や燃料電池の導入が必要となる。これらはコストが高

い、稼働率が低いとか出力の時間変動が大きいという問題がある。

燃料電池は水素と空气中酸素の電気化学的な反応によるもので化学発電とも言われる。水の電気分解の逆で水を作るときに電気が発生する。純粋な水素を安全に大量に供給することは難しいから、天然ガスから供給するのがコストとしては安くなる。

原子力利用は微妙な位置にあるが、安全性と高濃度の核廃棄物の捨て場所のないことから、もはやばら色の未来を描き出すものではない。その点、エネルギー効率は悪いが埋蔵量の点から石炭が見直されるのは時間の問題であり、当面のエネルギー転換は石炭利用に依存する部分が多いと思われる。

石炭の燃焼はガス流量により主にストーカ（火格子）燃焼、流動層燃焼と微粉炭燃焼に分けられる。ストーカ燃焼は粘土層を固定層としたもので装置の構造が簡単であるため、古くから工業用に使用されてきたが、石炭処理量が制約され、減少傾向にある。国内外において、石炭火力発電には微粉炭燃焼が多く用いられているが、低公害化を目的とすると燃料の石炭の使用範囲が制限されること、金属類の微粒子が気相へ搬流するためのトラブルや排ガス処理効率などで問題がある。これに対して流動層燃焼は粒径数mmの石炭を珪砂のような流動媒体といっしょに1000℃程度の流動状態で燃焼させる方法であるが、石炭の種類の多様化に対応でき、炉内脱硫・脱硝が可能であるから、最近産業用ボイラーとして急速に普及してきた。

さらに効率のよい石炭ガス化複合発電方式（IGCC）も普及してきている。石炭をガス化し精製した後、ガスタービンで燃焼させ発電させるとともに、高温のガスで蒸気を発生させ、さらに蒸気タービンによる付加発電を行わす。

従来の石炭による大気汚染の最たるものはSO₂であった。しかし、このような新しい燃焼技術の開発と処理技術により、SO₂の排出量はある程度抑えられるかもしれない。石炭燃焼により発生するアルミニウム（Al）やカルシウム（Ca）などの非揮発性の元素はほとんど揮発しないし、砒素（As）、ホウ素（B）、ベリリウム（Be）、カドミウム（Cd）、銅（Cu）、セレン（Se）、バナジウム（V）などの元素は揮発するが電気集塵器の温度で凝縮して、それ自体で石炭灰粒子を形成するか、粒子表面に凝縮する。しかし、塩素（Cl）、フッ素（F）や水銀（Hg）な

どは炉内の温度条件で揮発し、排煙脱硫装置で完全には捕集されない¹¹⁾。さらに、有機物が燃焼した後の石炭灰は大きな問題となりつつある。

石炭灰は粒径によってフライアッシュ、シリンダーアッシュとクリンカーアッシュに分けられる。これは燃焼中あるいは石炭灰の保管中に大気中にも舞い上がるし、石炭灰自体の保存中あるいはセメント材料としての使用中に雨などによって、有害成分が溶け出してくる可能性がある¹²⁾。主な成分は珪素（Si）、Al、CdやMgなどとされているが、純水を用いたフライアッシュからの溶出試験では六価クロム、砒素、銅や亜鉛が溶け出し、0.67N酢酸ではCdや鉛（Pb）も溶け出るとの報告もある¹²⁾。さらに水銀、セレンやホウ素などが注目されることになると思われる。とりわけ問題になるのは、現在は良質の瀝青炭を主に使用しているが、今後より低品位炭へ移行されることである。

現在、日本の石炭消費量は1億トン以上であり、そのほとんどは輸入に頼っている。日本の火力発電の10%は石炭火力である。世界銀行の予測では、東アジア地域では石炭燃料の使用により2020年にはSO₂の排出量は約3倍になると予想されているが、対策面から考えると問題は石炭灰の方かもしれない。

9. 秩序の回復・バランスの保持

現在の大気の組成は40億年の地球の歴史が生み出した産物である。そして、その大気の組成に順応し、すべての生物は生を得ている。この200年間のとりわけ前世紀最後の50年間のような大量生産・大量消費がなされる以前の時代には、大気環境と人・生物とは良好な関係を保ちバランスを保持していた。温室効果ガスまでもが、地球の温暖な気候を保証するものであった。したがって、大気中の化学成分の量と比ならびに温度を含めた大気の状態は、生物の生存に最適であり、生物はその大気環境を織り込んで生存を保障されてきた。このことから考えると大気の組成には何一つ無駄なものがないと考えられる。

N₂Oは化学的には不思議な物質である。中性酸化物であり、水と反応しても次亜硝酸（H₂N₂O₂）を作らないし、アルカリと反応しても亜硝酸（NO₂⁻）を作らない。きわめて安定な物質であり、大気中に0.25ppmという高濃度で存在してきた。同様にメタン（CH₄）も安定であり、大気中に1.5ppmも存在する不思議な物質である。これらはCO₂と同様に地球

を暖める役割を果たしてきたが、自然的発生源から放出され大気構成成分として高濃度で安定に存在する。現在の科学的な知識では解明できないだけであって、 N_2O も CH_4 も人や生物の存在に欠かせない物質ではなかろうか。 N_2O は安定な N_2 に余分にOが一つくっついた不安定な構造であるにもかかわらず安定であり、ある種の生物にとって O_2 が不十分な嫌気的な環境下では呼吸のための O_2 の供給源となっているようである。 CH_4 も生命感のある物質であり、その4つの水素(H)も何らかの役割を果たしているであろう。

CH_4 は可燃性で、 N_2O は還元型であるため、 O_2 が過剰にある地球大気の下では酸化されて CO_2 や NO_3^- になった方が熱力学的にずっと安定である⁷⁾。現在の大気は熱力学的な平衡からは極端にずれており、これはこれらの気体が連続して地表から補給されていることを示している。つまり生物の活動によってバランスが保たれている。

有害なNOですら、存在場所と量によっては人の生存に不可欠であるかもしれない。狭心症の治療にはニトログリセリンなどの亜硝酸系の薬品を使用するが、これはニトロソチオールを経てNOに変化して作用するようである。また、NOは信号伝達分子として脳内での機能も示唆されている¹³⁾。

それどころか、人を含めた生物中にはすべての元素が含まれている、すべての元素は何らかの役割を担っている、生体必須元素：「拡張元素普存説」³⁾も示されている。物質における元素の分配と分布は、それぞれの生物種の固体維持と機能発現のために遺伝的に決められる。とりわけ選択的機能発現と生命維持のために多くの微量元素が利用されていることがわかっている³⁾。

固定ならびに移動の燃焼施設によって燃料を燃やし、その後で汚染物質を触媒を使う化学反応などで除去した場合、もしかしたら燃やす前の空気よりある種の成分の濃度が減少し、燃焼前より「きれいになる」場合があるかもしれないが、その際は人や生物にとって必要な物質を除去している可能性がある。

大気環境の成分には無駄なものはない。大気汚染はその量が変動したり、その比が激変することによりもたらされる。現在の環境問題はこのバランスの崩壊であることを想起し、大気汚染対策は総合的視点からなされる必要がある。

10. お わ り に

現在の地球環境の悪化をもたらした原因の一つに開発途上国の急激な人口増加もあるが、それに加えて、限りある地球の資源とエネルギーに対して、欧米や日本などの先進国が経済の発展を追求し、大量に資源とエネルギーを使用して大気汚染物質などを環境に放出し、環境のバランスを崩してきたことにある²⁾。

再生能力を超えてしまった再生可能資源の消費量、新しい再生可能資源の開発能力を超えてしまった非再生資源の消費量、ならびに地球の持つ浄化能力を超えてしまった汚染物質の排出量(Herman Dalyの法則)。これらを考えれば、21世紀の環境問題への対処はまず、大量生産、大量消費ならびに汚染物質の大量排出の悪循環をどこかで断ち切ることからスタートする。そのことがなければ、人類自体の生存は保持されない。

謝辞：本稿起稿にあたり、有意義な議論をしていただいた兵庫県立公害研究所の平木隆年主任研究員ならびに藍川昌秀博士に深謝します。

参 考 文 献

- 1) 玉置元則：化学物質がもたらした大気環境の混乱と秩序の回復, I. 環境技術, 30 (5), 393-400, 30 (6), 477-480 (2001)
- 2) 加藤三郎：環境と文明の明日, プレジデント社 (1996)
- 3) 原口紘子：元素の組成から見た地球と生物, 現代化学, 2000 (7), 16-22 (2000)
- 4) 日本化学会：環境・防災ライブラリー, 微量元素, 丸善 (1975)
- 5) J. D. Lee：無機化学 (浜口博, 菅野等訳), 東京化学同人 (1982)
- 6) 健康影響評価検討会重金属評価作業小委員会, ニッケルの健康影響について, 大気環境学会誌, 35 (2), A22-A46 (2000)
- 7) 環境庁「オゾン層保護検討会」編：オゾン層を守る, NHKブックス (1989)
- 8) 常石敬一：NHK人間講座, 20世紀の化学物質, 人間が造り出した毒物, 日本放送出版協会 (1999)
- 9) WHO：EHC188, 窒素酸化物 (小林剛訳), 丸善 (1999)
- 10) 秋元肇：光化学オキシダントの逆襲, 大気環境学会誌, 35 (2), A48-A51 (2000)
- 11) Trace Element Workshop 2000 (燃焼プロセスにおける微量成分ワークショップ) 要旨集, 2000年1月13-14日, 横浜市, 微量成分研究会 (2000)
- 12) 湯浅一郎, 松田宏明：地球環境をこわす石炭火電, 技術と人間 (1997)
- 13) 季刊化学総説 No30, NO, 化学と生物, 日本化学会 (1996)