

## 第11章 中国における酸性物質の排出

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/2482">http://hdl.handle.net/2297/2482</a>

# 第 11 章

## 中国における酸性物質の排出

富山工業高等専門学校環境材料工学科

丁子 哲治

email: chohji@toyama-nct.ac.jp

### 1. はじめに

酸性雨は、化石燃料を燃焼したときに発生する酸性物質が原因となって、それらが大気中を長距離輸送される過程でさらに酸化し、その結果としての物質が雲に取り込まれたり、雨に溶解したりして、国境を越えた地域の動植物や建造物に影響を及ぼす、と言われている。北陸では、冬季の降雪量も多いことから、「酸性雨雪」として知られている。この「酸性雨雪」は、「地球温暖化」や「成層圏オゾン層破壊」などと並ぶ地球環境問題としてよく知られている。

しかしながら、例えば地球温暖化では、地球が急激に温暖化することが環境に大きな負荷を与えることや、成層圏オゾン層が破壊されれば、地上生態系に有害な紫外線量が増加するなど、比較的判りやすいと言える。しかし、「酸性雨」では、文字通りに「雨が酸性化すること」だけがこの環境問題の本質を表現していないことから、名称から受けるイメージとは随分異なり、理解を難しくしているように思われる。

小学生向けの環境教育の教材にも頻繁に使用されるなど、数ある地球環境問題の中では比較的よく理解しやすいものの一つとして考えられているようである。しかしながら、その原因と環境影響の結果との因果関係が、実はよくわかっていないのが現状である。これまでのように、降雨の酸性化という意味の「酸性雨」としてのメカニズムだけではよく説明できない現象が多いのである。

いわゆる「酸性雨」問題は、「酸性雨」と表現するにはあまりにも無理があり、その本質を表現するには、「人為的発生源から放出された大気降下物による環境問題」とでも言うべきであろう。しかし、社会的には既に「酸性雨」がほとんど定着してしまっており、北陸では、「酸性雨雪」として社会に広く受け入れられている。そこで、まず、「いわゆる酸性雨雪」に関する基本的解説を行うこととする。

その上で、近年の急速な経済発展および工業発展を続けており、典型的とも言える現象が種々報告されている中国の現状について、著者らが調査研究した結果(1, 2, 3)をも含めて概説する。中国では、現在

もエネルギー生産の約 70%は石炭に依存しており、しかも硫黄含有量の高い石炭であるために、石炭燃焼によって排出される硫酸化物や煤塵による大気汚染問題、いわゆる「酸性雨問題」が深刻な状況となっている。このような大気汚染物質は、日本海を越えて長距離輸送されることから、わが国でも対岸の火事として看過できない。

### 2. 酸性雨雪に関する基礎

#### (1) 酸性雨研究の歴史

酸性雨”Acid Rain”という言葉を最初に使ったのは、イギリスの R. A. Smith が、1872 年に発行した著書の中であった。彼は、イングランド、スコットランド、ドイツなどで降水の酸性化を観測し、その降水に含まれる化学成分は石炭燃料に関連することを指摘し、さらにその植物や材料の被害などについても言及した。しかしながら、当時 Smith の研究成果は長期間埋もれることとなった。

1968 年にスウェーデンの土壌学者 S. Oden は、初めてヨーロッパにおける降水成分の分布や変動をまとめ、次の結果を得た。

1) 酸性雨は広域的な現象であり、硫黄や窒素を含む大気汚染物質が 100~2000km の範囲でヨーロッパ各国上を長より輸送される。

2) 降水および地表水が次第に酸性化を強めている。すなわち、スカンジナビア半島の酸性雨の原因は、イギリスやドイツを中心とする中部ヨーロッパからの大気汚染物質であるとの説を発表した。彼の考えについては、当初賛否両論があり、特にスウェーデンの酸性雨の原因物質は中央ヨーロッパからの長距離輸送によるとの考えは国際的な議論を生んだ。この S. Oden の発言によって、1972 年に第 1 回国連人間環境宣言で越境汚染の抑制義務が明示された。その後、ヨーロッパ諸国を中心として「長距離越境大気汚染条約」が締結され、1979 年から越境汚染の国際調査が開始されている。

わが国の酸性雨としての調査研究の発端は、以上

の欧米の事情とちょっと異なっている。すなわち、酸性雨が大きく注目されるようになったのは 1973～75 年に汚染された霧雨が目や皮膚に刺激を与える人体影響が関東で報告されたことである。環境庁（当時）や自治体によって、1975～79 年に原因解明のための調査研究が行われたが、その後同様な現象が二度と起こらなかつたことから、結局今日まで原因については推定の域を出ていない。おおよそ、この時代までは文字通りの酸性の雨に関する調査研究が行われた。

一方、1970 年代の後半になると、欧米における酸性雨問題やこれに伴う生態系への深刻な状況が伝えられるようになって、1983 年から 5 カ年計画で、環境庁（当時）を中心とした地方自治体が全国の酸性雨の状況を観測するなど、精力的な調査研究を開始した。このころになると、降水ばかりでなく、晴天時に地上にエアロゾルとして降下してくる物質も無視できないとして、前者を湿性降水物、後者を乾性降水物と区別されるようになった。もはや雨ばかりが問題ではないという認識に至つたのである。さらに、当初は工業地帯とその周辺に対する影響として、極めて地域環境問題的取り扱いであつた。調査研究が進むにつれて、日本海側の酸性度が強く、硫酸イオンの地上への沈着量も高いことから、俄かに大陸からの長距離輸送問題として注目されるようになった。

## (2) 環境問題とは？

酸性雨研究の歴史では、降水が化石燃料の燃焼によって酸性化するという現象に注目がされてきた。それでは、酸性雨とは酸性の雨のことなのか。また、そのことが何故環境問題となるのか。このような素朴な疑問が「酸性雨」には付きまとう。

このことに答える前に、「環境」とは何かについてよく理解しておかなければならない。一般に、「環境」とは人間が知覚し得る全てのもの、と解釈されているが、環境問題を扱う環境とはもっと厳密に定義される。すなわち、環境とは、人間活動に影響を及ぼし、かつ人間活動によって影響をうける、身の回りのもの、という定義である。一方的に影響を及ぼすだけの対象は環境ではなく、その現象は環境問題とは言わない。例えば、火山の噴火や自身などは我々の生活に大きな影響を及ぼすが、それらが起こる原因に人間活動はまったく関与しないことであり、これらは環境問題ではないことは言うまでもない。環境問題の範囲を明らかにしておく意味は、起こつた現象の原因が、人為的な部分と自然現象の部分を区別しておかなければ、合理的な対策が取れないからである。雨が酸性になる原因には、人為的ではない部分が少なからずあることは意外と知られていない。

## (3) 酸性雨は酸性の雨か？

中性の溶液では、水素イオンと水酸化物イオンの濃度は等しく、 $25^{\circ}\text{C}$ で  $1.01 \times 10^{-7} \text{ mol/dm}^3$  である。この数値を対数にし、マイナスを付けた値が pH である。



図 1. 環境問題における環境とは

したがって、中性の pH は  $25^{\circ}\text{C}$ で 7.0 である。この値より小さい場合は、水酸化物イオン濃度より水素イオンの濃度が多いときで酸性という。このことは化学の講義で教えることである。

純水の pH は 7.0 であるが、清浄な大気中に放置しておくくと徐々に pH が低下し、やがては pH が 5.6 付近の酸性になる。この理由は、大気中に自然に 370ppm 程度含まれる二酸化炭素が純水に溶解して、水溶液中で水素イオンを放出し、平衡に達した状態での pH が 5.6 となるためである。清浄な大気中の雨滴も大気中の二酸化炭素を溶解しているために、pH が 5.6 の酸性となる。この状態の雨は、酸性ではあるが、人為的な影響がないために、環境問題とはならない。すなわち、化学的には酸性であるが、「酸性雨」ではない。しかし、人為的な行為によって大気中に放出された酸性ガスなどが雨滴に溶解すると、当然その雨滴の pH は 5.6 以下になるはずである。このことから、一般的には、環境問題である「酸性雨」は、pH が 5.6 以下の雨という定義がされている。

天然に放出される酸性のガスは二酸化炭素だけであろうか。実は、火山や海洋からも硫黄成分が放出され、これらが大気中で酸化されて雨に溶解することが考えられる。火山からは大量の二酸化硫黄が放出されている。例えば、桜島から放出される量は、日本全国の人為的な発生源からの放出量にほぼ匹敵すると言われている。2000 年 6 月に活発な活動を始めた三宅島雄山からは、アジア全体の人為的な発生源からの放出量にほぼ等しい二酸化硫黄が放出されていると見積もられている。

海洋からは、海洋中プランクトンの活動によって、ジメチルスルフィドという化合物が放出される。この物質は、いわゆる海の近くで感じる磯の香りの成分であるといわれている。このジメチルスルフィド

は、大気中で非常に反応性が高く、二酸化硫黄を経て硫酸にまで酸化される。このような海洋からの硫黄成分の放出量は、世界全体では、火山からよりも多いと言われている。

自然界から放出された硫黄酸化物が雨に取り込まれ、溶解すると pH が 5.6 以下の雨になることになる。地球全体で、自然界から発生する酸性ガスを見積もって、それらが雨に溶解したとすると pH は 5.0 程度になる。したがって、環境問題としての酸性雨は、pH が 5.0 以下の雨であると主張する研究者も多くなる。

このことを別の言い方をすれば、酸性雨を定義する pH の値は、環境に影響があるかないかではなく、人為的な影響を受けたものかどうかとすることである。一般的には、雨の pH が 5.6 以下であるから、酸性雨であり、環境への影響がある、との誤解が多く見られる。環境への影響については、雨などの酸性度については、化学的に酸性の雨について考えなければならない。

一方、pH が 5.6 以上の値を示す雨はどうであろうか。一般に、酸性側のことしか議論されない傾向にあるが、pH が 5.6 以上の弱酸性や中性、あるいは弱アルカリ性の雨についてはどうであろうか。このことを考えさせる良いデータ（図 2）がある。熊本市で昭和 38 年ごろから観測された大気降下物の pH データがある。社会的に酸性雨の問題が知られるようになる随分前から、大気からの降下物をデポジットゲージという観測手法で測定した結果である。

このデータを見ると、観測が開始された昭和 38 年頃から徐々に pH 値が低下し始め、このままいくととんでもない強酸性の雨が降ることを予想した研究者も、ちょうど昭和 60 年前後には多かった。このデータを見ると、注意しなければならないことがある。

水溶液中の pH は、溶液に含まれる酸性成分と塩基性成分の濃度のバランスにより決定する。大気中に二酸化炭素以外の水溶性成分が含まれない場合について、純水は pH5.6 になることを既に述べた。大気中に塩基性の物質が含まれ、これが水溶液に溶解した場合はどうなるだろうか。当然、水溶液の pH は 5.6 以上の値を示すことになる。

このような知識のもとで、図 2 のデータをあらためて見てみると、昭和 40 年ごろから pH7 付近から徐々に低下していることが判る。すなわち、昭和 40 年ごろの降雨には、大気中の塩基性物質を多く溶解していたことが推測される。その後、pH が低下してきたのは、少なくとも pH5.6 までは、この塩基性物質の溶解量が減少したのか、酸性物質が増加したのかは、このデータには含有化学成分濃度がないので詳細は不明である。そこで、種々の状況証拠から検討を試みた。

図 3 は、国設の大気観測局で観測された大気中二酸化硫黄濃度の年平均値の経年推移を示す。ここで、注目すべきことは、降雨の pH が低下する様子とこの二酸化硫黄濃度の推移の傾向がほぼ一致することである。

降雨の酸性化の原因とされる二酸化硫黄が大気中から減少しているにも係わらず、降水の酸性化が進むという矛盾した現象である。このことは、次のことから考えられるべきであろう。大きな社会問題となった公害事件を契機にして、排ガス規制の取り組みが行われ、各事業所では高性能の排煙脱硫装置が設置されるようになった。このことによって、図 3 のデータに見られるように、昭和 43 年頃から大気中の二酸化硫黄濃度が低下し始めた。しかし、化石燃料の燃焼によって、種々の金属酸化物も煤煙として大気に放出されていたが、これらも同時に排煙脱硫に伴って除去されたのである。したがって、大気をアルカリ化する金属酸化物の放出が抑制されたことによって、降下物の pH が低下し、今日の降下物の pH が示す値は、十分に清浄な大気であることを意味しているのではないかと考えられる。さらに、降下物をアルカリ化の原因として、道路舗装率の低さも考えられる。これらのことのいずれも、昭和 45 年以前の降下物が pH > 5.6 であることを裏付けており、図 2 のデータは、現在の状況として急速に大気が酸性化しつつあるとの懸念には結びつかないものである。

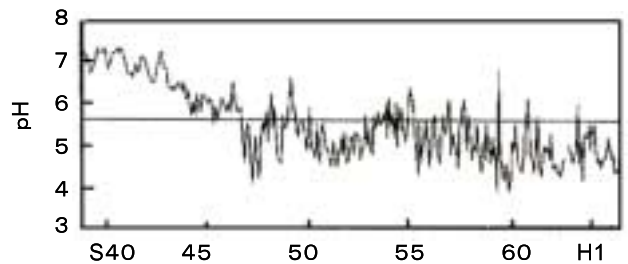


図 2. 熊本市で観測されたデポジットゲージ貯留水の pH の推移（昭和 38 年～平成 2 年）  
（図中央のラインは、pH5.6 の値を示す）

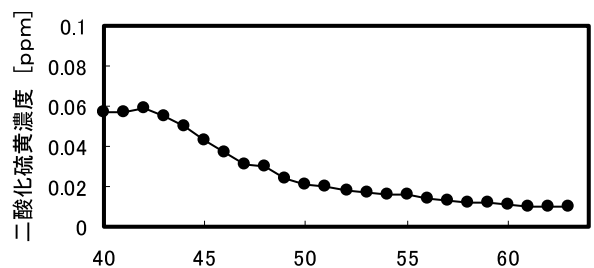


図 3. わが国の二酸化硫黄濃度の推移（昭和 40 年～63 年）

#### (4) 酸性雨は地球環境問題か？

地球環境問題とは、原因とその被害や影響が一つの国や地域にとどまらず、地球規模にまで広がる環境問題や、先進国を含めた国際的な取り組みが必要とされる発展途上国を中心とした環境問題のことを言う。その例として、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨、熱帯林の減少、野生生物の種の減少、海洋汚染、有害廃棄物の越境移動、砂漠化、開発途上国の環境問題などがある。

一方、原因とその被害や影響の範囲が一つの地域に限定されるような場合には地域環境問題として定義され、わが国の過去の公害などは地域環境問題として分類される。

言うまでもなく、酸性雨は地球環境問題と言われるが、地域環境問題である部分もあり、その定量的評価が大きな研究課題となっている。しかし、一般的に酸性雨は両者の区別なく語られることが多く、混乱している場合も否定はできない。この意味で、他の地球環境問題とは異なる困難な面を持っている。

先にも述べたが、わが国最初の酸性雨現象は、間違いなく地球環境問題としてではなく、地域環境問題として捉えられた。太平洋側の工業地帯が汚染物質の発生源で、当然その周辺で降雨の酸性化が起こっているものとの想定で、観測が始められた。関東地域での森林の枯死の調査研究が現在も活発に行われているが、これらのほとんどは、長距離輸送を伴う地球環境問題ではなく、東京を中心とする人口密集地の発生源からの影響について検討されている。

全国的な降下物の調査研究の結果、日本海側の酸性度が太平洋側より強く、さらに冬季にその傾向が強いと思わせる観測データが得られた。このことから、日本海側の降水の酸性化は日本海を越えて来る気流に乗って、中国大陸からの長距離輸送の結果ではないかとの疑いから、大規模な調査研究が行われてきた。

これに対して、当初、中国政府は、中国の酸性雨は地域環境問題であるとの認識で、中国で発生した汚染物質は、日本にまで国境を越えて長距離輸送されてはいないとの見解であった。しかしながら、日本の研究者は、日本海側の降下物の酸性度が太平洋側より強いことや、硫酸イオンの沈着量が多いこと、さらに気流が西から東に流れることから、酸性物質の発生源は中国大陸にあるとの推測から、強く中国との共同研究を求めてきた。このようなことから、現在の東アジア酸性雨観測ネットワークの構築に発展してきた経緯がある。

#### (5) 環境破壊の原因物質としての降下物

化石燃料を燃焼すると、二酸化炭素、硫黄酸化物、窒素酸化物、塩化水素をはじめとして、煤塵などの

種々のガス成分や粒子状物質が大気に放出される。これらのうち、地球環境問題のひとつの地球温暖化物質である二酸化炭素や微量であっても人体に対する発がん性などの疑いなどからその排出規制が望まれる煤塵や PAHs などの大気汚染物質も問題である。しかしながら、酸性降下物の前駆物質としては、硫黄酸化物や窒素酸化物などが主要な成分である。

硫黄酸化物は、燃料中に不純物として含まれる硫黄成分が燃焼中に酸化した物質である。一方、窒素酸化物は、燃料に含まれる窒素成分が前駆物質となるフェュエル-NOx と、燃焼空気中の窒素が高温で熱せられることによって窒素酸化物となるサーマル-NOx とがある。さらに、塩素を含有する樹脂などの燃焼によって、主として廃棄物燃料路などから発生する塩化水素も酸性降下物となる場合もある。

大気に放出された、硫黄酸化物、窒素酸化物は大気中の種々の微量成分などが酸化剤や触媒となって、さらに酸化反応が進み、最終的には硫酸イオン、および硝酸イオンとして気体成分および粒子状成分として大気中を漂うことになる。塩化水素は、水分と反応するとそのまま塩化物イオンとなる。これらが、ガス状あるいは粒子状物質として、地上に沈着する場合を乾性降下物、雲水や降水（雨、雪、霧など）に取り込まれて地上に降下してくる場合を湿性降下物と呼んでいる。酸性の降雨を「酸性雨」と呼んでいるが、いわゆる酸性雨現象は、乾性、湿性降下物の両方を含んでいる。

硫黄酸化物の発生源としては、人為的産業活動による発生と自然界からの発生がある。人為的発生源としては、石油や石炭などの化石燃料中の硫黄分を燃焼することによる工場や火力発電所などであるが、わが国では排煙から硫黄成分を取り除く排煙脱硫の技術が世界でもトップクラスにあり、年々その排出量は減少している。自然現象による発生源として火山による噴煙が無視できず、鹿児島県の桜島から放出される硫黄酸化物の量は、日本全国の人為的発生量に、さらに三宅島の三原山からの量は、アジア全体の人為的発生量にほぼ匹敵すると言われている。

### 3. 中国の現状

#### (1) 硫黄酸化物の排出量

日本、韓国および中国を含む東アジア地域は、硫黄酸化物および窒素酸化物の排出量から推定すると、北米やヨーロッパとならび、酸性雨による被害が懸念される地域として以前から指摘されてきた。実際に中国で酸性雨などの大気汚染による被害が深刻な問題として報告されるようになって来た。

アジア地域の硫黄酸化物放出量について、ヨーロッパと北アメリカと比較して図4に示した。アジアからの二酸化硫黄の放出量は、1990年までにアメリ

力を上回り、1995年にはヨーロッパをも上回った。先進国の多い、アメリカ、ヨーロッパでは、減少傾向にあるにもかかわらず、アジアでは、急激な増加傾向にあることにも注目を要する。

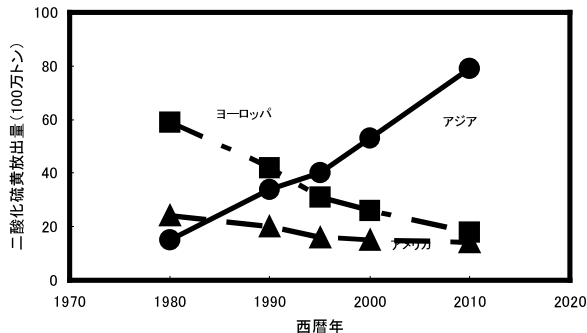


図4. 二酸化硫黄放出量の推移と将来予測

中国での硫酸化物の排出量は、黄海沿岸地域が多く、その中でも北京、天津などの人口が集中した大都市において著しい。その他では、重慶市を含む四川省では、 $4.55 \text{ t km}^{-2} \text{ y}^{-1}$  であり、貴陽市を含む貴州省では、 $4.27 \text{ t km}^{-2} \text{ y}^{-1}$  であり、日本の  $3.03 \text{ t km}^{-2} \text{ y}^{-1}$  より多い。

## (2) フッ化物の排出

中国では、石炭の使用に伴って、二酸化硫黄や煤塵などの大気への放出による環境影響はすでに述べたが、中国石炭にはフッ素が高含有量で含まれていることによる深刻な問題は、あまり知られていない。中国石炭に含まれるフッ素の含有量は平均で約 250ppm であり、これは世界平均値よりも3倍以上も高い。石炭中には、白雲母とフッ化カルシウムおよび有機構造-CF<sub>2</sub>-としてフッ素が存在している。

このような石炭を燃焼すると、フッ化水素として大気に放出される。高濃度のフッ化水素は生態系に強い毒性を示し、わが国でも火山からのフッ化水素によって植物が広範囲で枯れるなどの現象が起こっている。しかし、中国では生態系への被害に止まらずに、人体影響として現れている。

フッ素は人体にとって必須元素といわれているが、1日 8mg 以上の過剰摂取によって、人体に大きな影響を与えることが判っている。人体に摂取されたフッ素の 99%は骨に堆積するので、フッ素症の病状は歯や骨の異常で現れる。現在の中国では、約 59600 万人の人がフッ素汚染の危険地域に居住し、おおよそ 4900 万人のフッ素症患者がいる。中国のフッ素汚染地域は、地下水が汚染源のところもあるが、貴州省や四川省で石炭燃焼ガス起源のフッ素汚染が見られる。

実際に人体への影響が報告されていないにしても、中国石炭のフッ素含有量が高いことから、中国東北部では石炭火力発電所の周りに同心円状に土壌のフ

ッ素汚染が起こっている例もある。また、韓国ソウル市近郊での酸性雨観測では、西よりの風が吹くときは、降雨中のフッ化物イオン濃度が高くなるデータが報告されている。

## (3) 降下物の現状

中国の代表的な各地の降下物の pH 値を表 1 に示す。pH の低い値が 3 台から、高い pH 値では 8 を超えている。先にも述べたように、降下物の pH 値からは、十分な情報は得られないが、表 1 のデータからは、相当量の大气汚染物質が降下物として陸上に沈着していることが伺える。

中国の酸性雨は、日本や北アメリカやヨーロッパに比べて異なる点として、硝酸よりも硫酸の割合が多く、化学成分組成はいわゆる硫酸型の特徴を持つ。これは、化石燃料消費の約 70% (1995 年) を占めている石炭の硫黄含有量が高いことが大きな原因である。しかし、エネルギー生産としての石炭使用量が 1995 年をピークに減少に転じており (図 5)、それに伴って二酸化硫黄の排出量も減少し始めている (図 6)。

中国における降水の酸性化が進んでいる地域は、中国中央部に東西に走る秦嶺山脈の南側にほとんど集中しており、中国全土の 9 割を占めている。その中でも、重慶市、貴陽市、柳州市、および長沙市の周辺は、酸性化がもっとも進んでいる地域である。秦嶺山脈以北の東北、華北および西北地域でも、硫酸化物排出量が多い地域があり、大気中の二酸化硫黄濃度も年平均値で、わが国の国設大気測定網の東京や川崎と比較すると、中国北部の瀋陽、北京や西安は 3~6 倍と高いにもかかわらず、いずれの地域でも降水の酸性化はみられていない。中国の降水中の化学成分は東部アメリカ合衆国と比較すると、硫酸イオン、アンモニウムイオン、カルシウムイオンなどの濃度が高い。降水の pH は、酸である陰イオンと塩基である陽イオンの比率によって決定される。北京や天津は重慶や貴陽に比べると、硫酸イオン濃度についてはほぼ同程度であるが、アンモニウムイオンやカルシウムイオンの濃度が高い。このことによって、中国北部では、降水の酸性化が生じていないと考えられている。一般に、長江の南側は酸性土壌で、北側は東北部の一部を除き塩基性土壌が分布している。大気中の粒子状物質は、この土壌の化学的な性質を反映して、降水に溶け込んだ場合には酸の中和成分となると推定される。

中国南部における降水の酸性化は、局地汚染と大気汚染物質の中・長距離輸送の両方に起因する。重慶のように大気汚染が進んでいる都市における降水の酸性化は、主に局地汚染を反映した雲下洗浄 (ウォッシュアウト) によるものであり、その周辺数百 km にもたらされる広域的な降水の酸性化は、主として大気汚染物質の中・長距離輸送による雲中洗浄 (レ

インアウト)であろう。中国南部の大部分の都市においても降水の酸性化は、その寄与は都市によって異なるが、両者の複合的影響によっているようである。

重慶は、中国南部の内陸部にある四川盆地の東南部に位置している。この都市は、長江と嘉陵江との合流地点にあるため、湿度が高く、霧が多いので、「霧の街」とも呼ばれている。また、衛星からも隠れた都市とも言われる。年間降水量は1000mm程度であり、盆地のため、風速が弱く、年間清風率が40%にも達し、高度300m以下の逆転層が発生しやすい。

表1. 中国各地の降水物の pH 値

地点名	1995 年	1996 年	1997 年
青島	4.08~7.20	3.72~7.83	3.46~8.00
南京	3.90~8.14	3.80~7.98	3.90~8.26
広州	3.83~7.73	3.62~6.88	3.78~7.35
重慶	3.08~8.06	3.30~7.66	3.28~8.70
長沙	2.92~5.25	3.00~5.60	3.01~3.74

中国環境年鑑 1998 より

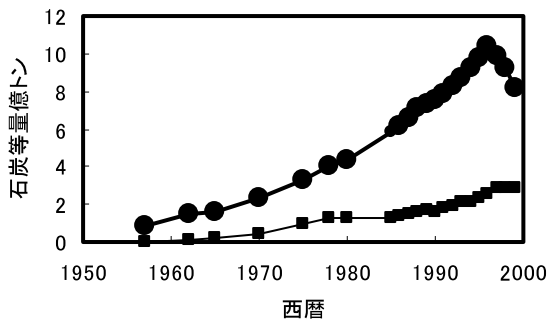


図5. 中国におけるエネルギー消費量の推移 (●: 石炭, ■: 石油)

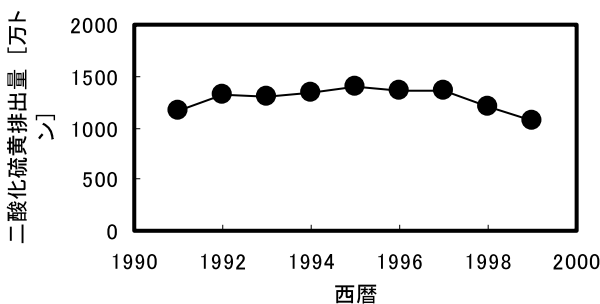


図6. 中国の二氧化硫黄排出量の推移

このような地理的気象的な状況と大気汚染物質の排出量の多さから、世界でも最も酸性雨などの大気汚染などによる被害が深刻な地域の一つとなっている。

#### (4) 森林の衰退

森林生態系においては、1950年代から60年代に

かけて中部ヨーロッパで森林生産量が増加するという現象が認められた。森林生産量の増加は20~50%、場所によっては100%以上にも達した。現在では、この現象は酸性汚染物質、特に硝酸の降下量が増加し、森林生態系への窒素分の供給が増加したことが原因であると考えられている。この森林生産量の増加に引き続いて、1970年代に入って、旧西ドイツ西南部のSchwarzwaldなどで、ツガやトウヒなどの針葉樹をはじめとする広範な樹種にそれまで知られていた病害とは全く異なった症状の病害が発生し始めた。この病害はまず針葉樹であるツガに現れた。葉の黄化につづいて落葉が始まり、樹冠全体の葉量が著しく減少し、最終的には枯死するといった症状であった。その後、こうした病害はトウヒやマツといった林業上重要な樹種である針葉樹類や自然林を構成する主要な樹種であるブナなどの広葉樹にも拡大していった。トウヒでは、新梢先端部が離層の形成によって変色することなく緑色のまま脱落するという、針葉樹類はそれまで全く知られていなかった症状が現れた。森林衰退とよばれているこの現象は、主要には、例えばモミ林では樹齢が80年から200年といった高樹齢の高地林で深刻化しており、可視的な初期症状の発現からわずか数年で枯死にまで至るなど、病害の進行は極めて速い。

森林衰退の原因については多くの説が提案されている。これらの説は、

- 1) 土壌酸性化により溶出したアルミニウムの毒作用説
- 2) マグネシウム欠乏説
- 3) 大気中のオゾン説
- 4) 窒素栄養過剰説
- 5) ストレス説

の5つに整理されている。1) および、2) に関しては、土壌学や植物栄養学の視点から酸性降水物との関連で提案されている説である。特に、1) はドイツの研究者であるUlrichらが森林土壌の長期にわたる野外観察に基づいて導き出した結論であり、また彼らが酸性降水物との関係で森林衰退の現象をそれがまだ顕在化していなかった時点で予測したことから大いに注目されてきた。

いずれにせよ、野外試験や生理試験の結果を考慮しても、現段階では、森林衰退の原因を酸性降水物の影響にのみ求めるには無理があるようである。少なくとも上記の各種の要因が複合的に作用して森林衰退を引き起こしていると考えるのが妥当であろう。

中国での植物生態系への影響については、重慶地区を中心に、既に1980年代の始めに現れた。1982年6月18日に重慶南部の巴県長生地区に14mm程度の降雨があった後に、667haの水田に稲枯れ被害が起こった。また1983年7月には重慶市の南縁に位置する南山の馬尾松の森林地帯で754haに及ぶ枯死被害が報告された。これらの原因の因果関係について

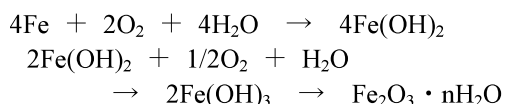
て厳密な結論は出されていないものの、二酸化硫黄を主原因とする酸性降下物による影響との密接な関係が推定されている。

実験的な研究によれば、降水の酸性度が農作物の生産に影響を与える pH 値は 3.5 以下であり、トマトなどのごくわずかな作物のみ pH4.0 付近でも影響を受ける程度ある。しかし、実際には降水の pH のみからは、植物の可視傷害や減産の原因となることはない。また、農地では土壌に対する酸性降水については、施肥などによる対策が可能である。実際に被害が起こる場合には、二酸化硫黄などのガス成分との複合作用などによるものと考えられ、この場合には対策は難しい。

都市の緑地化は、単に環境の美化を目的とするばかりでなく、気候の改善、有害なガス状、エアロゾル状物質の吸収、吸着およびろ過、さらには都市騒音からの遮音など、重要な寄与がある。中国の都市部で緑地化が積極的に行われており、重慶市などでも街路樹が多く植林されたが、その木の葉には常に粉塵が付着しており、黄褐色の傷斑が見られ、さらに病害虫に対する抵抗力も低下しており、成長の勢いが失われている現状である。

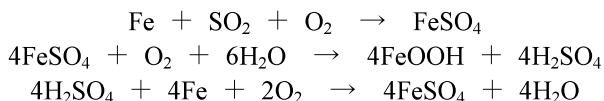
#### (5) 材料の劣化

金属材料は、腐食が最大の欠点であり、もっとも利用が多い鉄は、空気と水が存在する大気環境中では、次のように酸化することが知られている。



鉄の腐食は全面で均一に生じ（全面腐食あるいは均一腐食という）、腐食量は時間とともに増える。一般的な炭素鋼では、pH4~10 の範囲では酸素が存在することによって腐食し、その腐食速度は pH に依存しない。

ここに、二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) が大気環境に存在すると、鉄・鋼の腐食は促進される。その機構は次のとおりである。



この反応は、FeOOH が繰り返し生成し腐食が進行する自動接触反応である。

このような反応は、実験室的に検討された結果であり、実際にいわゆる酸性雨による影響に関しては

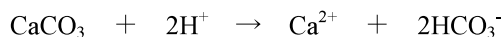
不明な点が多く、複雑である。少なくとも、硫酸化物、水素イオン、気温、紫外線、微量な大気汚染物質、エアロゾルなどの複合的影響を受ける。

自動車などの排ガス中に含まれる粉塵は、比較的粘着性があり、材料表面に付着しやすい。材料表面と粉塵との間に隙間ができ、この部分で水膜ができ、乾燥しにくい現象が起こる。このようになると、基本的に金属の腐食が水溶液中の酸素によって起こることを考えると、粉塵が付着して汚れた材料表面は腐食しやすいことになる。また、隙間では徐々に水分の蒸発によって、水溶液成分が濃縮されることにもなり、いつそう腐食が速まる傾向を示す。

以上のことを考えると、雨の酸性度よりもそれ以外の種々の要因が重要であることがわかる。さらに言えば、雨で洗い流されている場合には、その腐食が起こりにくいこともあり得る。

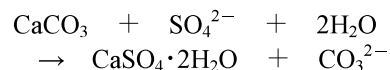
一般に、金属表面をもつ建造物は、耐蝕加工が行われている。しかしながら、文化財ではこのような加工を行うことができず、腐食を防止することが難しい。屋外にあるものは、屋内にあるものに比べて 2~3 倍の腐食速度といわれている。

次に、大理石などで造られた建造物などの文化財の被害が大きな問題である。大理石の成分である炭酸カルシウムと酸との反応は次のとおりである。

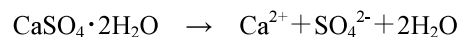


炭酸カルシウムの純水中の溶解度は比較的小さいが、水素イオンを多く含む酸性溶液中での溶解度は著しく増加することを上式は意味している。すなわち、この式は、強い酸の場合は、炭酸カルシウムが急速に溶解するが、pH が 5.6 程度の水溶液でも時間をかけると溶解することを意味する。自然にできる鍾乳洞はその例である。

一方、炭酸カルシウムの反応は水素イオンばかりでなく、次のように中性においても硫酸イオンと反応して、石膏を生成する。



硫酸カルシウム二水和物の溶解反応は次式で表される。



この関係から、水溶液中の硫酸イオン濃度が高いほど、多くの硫酸カルシウムが生成することが判る。



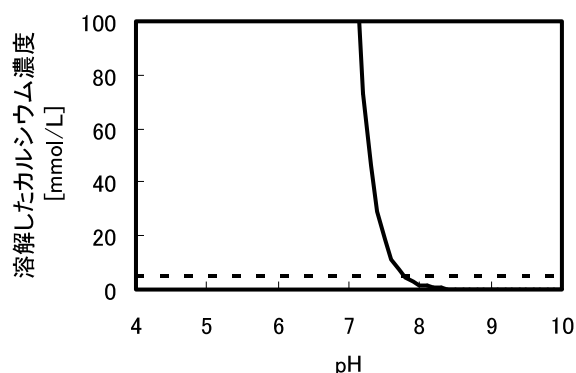


図7. 炭酸カルシウム（実線）と硫酸カルシウム（破線）の溶解度曲線

図7は、炭酸カルシウムと硫酸カルシウム二水和物（石膏）の溶解度の pH に対する関係を示した。この図は、石膏を硫酸イオンおよびカルシウムイオンの存在しない水溶液に溶解したときの関係を示しており、硫酸イオンがカルシウムイオンに対して高濃度で存在する場合には、カルシウムイオン濃度はより低い値を示す。この図の見方は、炭酸カルシウムの溶解度を示す曲線より、硫酸カルシウムの曲線の方が低い値を示すときには、炭酸カルシウムは硫酸カルシウムに変化する。また、逆の場合には硫酸カルシウムが炭酸カルシウムに変化することを意味する。したがって、中性付近でも水溶液中に硫酸イオンが共存することによって、炭酸カルシウムは硫酸カルシウムに変化する。

一旦硫酸カルシウムが生成すると、今度は純水に近い水溶液で洗われた場合には、中性付近で炭酸カルシウムより硫酸カルシウムは大変に溶解しやすいことが判る。すなわち、この計算結果から判ることは、大理石のような炭酸カルシウムは、強い酸で溶けるのはもちろんであるが、それほど強い酸でなくとも、硫酸イオンを大量に含む降雨で洗われても十分に炭酸カルシウムが溶解する現象が起こるのである。

例えば、北京などの歴史的都市には見事な大理石の建造物があるが、雨に当たる部分が大変に腐食しているところがある。北京の降水の観測ではほとんど酸性雨の定義にはいる降水は少ない。既に述べたように、北京は沙漠地域からの風送ダストによって弱アルカリ性になっているからである。しかし、降水中の硫酸イオンは非常に高濃度である。したがって、ここで述べたメカニズムによって、大理石は酸性の雨ではなくとも溶解する現象が起こっていると言えよう。

図8は、北京市にある天壇公園の大理石建造物である。写真では見にくいですが、随分と彫刻部分が滑らかになっている。紫禁城も同様な現象が見られる。

これらは、酸性の雨では説明できないが、硫酸イオン濃度の高い雨では説明できる。

図9は、四川省重慶市の重慶大橋である。図10は、その橋に立つコンクリート製電柱である。一方方向からのみのガス成分によって腐食したと思われる現象を示している。



図8. 天壇公園（北京市）



図9. 重慶大橋（四川省重慶市）  
（写真右に古い製鉄所がある。）



図10. 重慶大橋のコンクリート電柱の腐食  
（製鉄所がある方向だけに骨材が露出）

## (6) 陸水への影響

酸性降下物による環境影響として、森林の枯死がよく知られているが、北欧、北米および中国などでは河川や湖沼の酸性化も深刻な問題となっている。陸水の酸性降下物による水質の影響に関しては土壌の中和機能から説明される。土壌の構成を、固体相、気体相、液体相に分けて考えると、固体相部分には、岩石が砕かれた粒子、岩石が風化して生成した粘土鉱物粒子、動植物またはその遺骸等が含まれる。一方、気体相部分には大気組成とは異なった組成を持つ空気、液体相部分には土壌溶液が含まれる。土壌の機能を考えるとき、それらのすべてが含まれた状態で、はじめて機能すると考えなければならない。

土壌の中和機能に関して、大きく次の4種のメカニズムに分類される。

- 1) 土壌に含有する炭酸塩の溶解
- 2) 土壌粒子の陽イオン交換反応
- 3) アルミニウム二次鉱物の溶解
- 4) 土壌粒子の陰イオン交換反応
- 5) 土壌粒子間隙気体相中二酸化炭素の溶解

以上のうちで、1) はわが国のほとんどの地域の表層土では起こらない中和機構であるが、中国の揚子江以北では、砂漠地域の土壌粒子が風送されて堆積した土壌が豊富な炭酸塩を含むことから、ほとんどはこの機構により中和される。さらに、このような土壌粒子が大気に舞い上がり、大気中の酸性物質の中和にも寄与しており、降水の酸性化は観測されていない。3) はかなり強い酸性溶液に対して起こる反応であり、通常は考えない。一般的な土壌では、2) が主反応であるといわれてきたが、せいぜい pH6 付近にまでしか中和されず、河川水などが弱アルカリ性の pH を示すことを説明できない。5) のメカニズムのみでは、中和機能がないが、2) のメカニズムと同時に働くと、7以上の pH にまで上昇する。

生態系が豊富な土壌中には、その土壌粒子間に含まれる間隙気体中に時には 10% を超える二酸化炭素が含まれる。これは、動植物の呼吸、代謝、分解などによって放出された結果であり、土壌中の生態系の活性が高いほど、二酸化炭素の濃度も高くなると考えられる。この二酸化炭素の濃度が高いほど、2) のメカニズムによる中和機能を促進する度合いが大きい。さらに、このメカニズムは、降水の酸性度が強くなくとも、降水中のイオン成分濃度が高い場合には、十分に中和機能が働かないことも著者の研究で明らかになっている。

大気中粉塵濃度の高い中国では、降水の中に含まれ

る重金属濃度も高いが、さらに石炭の集積場や燃え殻の貯蔵場などが降水に暴露されることから水溶性の重金属が浸出する現象が報告されている。このような重金属は、降水量が多いほど河川に多く流され、小さい河川では重金属汚染の影響が大きくなることが、モデル解析と実測によって検証されている。

## (7) 黄砂の寄与

わが国では、春の風物詩として親しまれてきた黄砂現象であるが、近年社会的にも大きな環境問題として捉えられ始めた。2000年春に、石川県、富山県に設置されている大気監視網の浮遊粉塵計測器で、環境基準を超える値が計測された。本来、大気監視網は近隣の事業所から排出される煤煙などを監視し、基準を超えた場合にはその抑制を行政指導する目的のものである。ところが、県内の測定点で一斉に数値が跳ね上がったことから、その異常性にすぐに黄砂であることが判った。

中国では、1950年代以降、砂漠・乾燥地域において、強砂塵あらしの発生回数が急速に増加したと言われている。この原因としては、急激に拡大する砂漠化と、地球温暖化による気候変動が考えられている(4)。

気象台の観測では、黄砂の飛来日は年間に多くても数日という記録になっているが、大気からの降下物を観測すると2月下旬頃から6月上旬頃まで毎年連続して黄砂現象が見られる。大気上空の浮遊粉塵濃度を連続的に観測可能なライダーによっても同様な観測結果が得られている。

黄砂粒子は、砂漠土壌特有の母材となる岩石鉱物粒子の表面に炭酸カルシウムが10~20%程度の重量比で覆われた構造をしている。したがって、大気降下物中のカルシウム量が多いときは黄砂が飛来していると判断できる。

このように、黄砂粒子の表面が炭酸カルシウムであることから、大気中の酸性物質と反応することが考えられる。特に、黄砂の発生源から東に長距離輸送される途中に、中国沿岸部の工業地帯上空を通過することから、この過程で黄砂粒子表面に種々の大気汚染物質が反応し、あるいは吸着すると考えられている。そうすると、黄砂とともに大気汚染物質も長距離輸送されることになる。

炭酸カルシウムはアルカリ性であるから、大気中の酸性物質を中和するので、いわゆる酸性雨現象を緩和する働きがあるとの見解があるが、著者はこれに反対である。これまでに述べてきたように、酸性度ばかりでなく、降下物中の種々の化学成分が地上の環境に様々な影響を与えるからである。

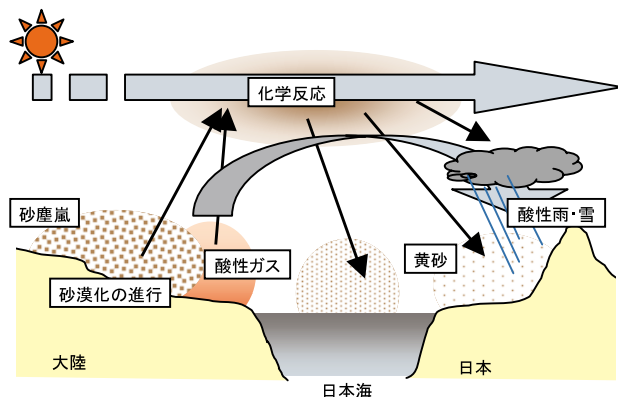


図 11. 黄砂と酸性ガスとの大気中での反応

#### (8) 排ガス中二酸化硫黄の削減技術

中国では、石炭燃焼炉から発生する二酸化硫黄などの削減対策は政府として種々の政策として進められている。その効果として、GDP ベースで経済成長率を 10%前後に保持しながら、石炭の全エネルギー消費量に対する割合を減らし、さらに 1995 年以降は、総エネルギー使用量も減少の傾向にある。しかしながら、中国では経済発展が大きな目的であり、環境対策には手が回らない状況にあることがわかる。

日本をはじめとする先進諸国で開発された環境対策技術は効率が高く、比較的大規模な施設を対象にしている。しかし、中国では、1) 設備投資が高い、2) ランニングコストが高い、3) 小規模施設が多い、4) メンテナンスの技術力もなく、必要な薬剤などの調達が国内でできない場合がある、などの理由により、先進国型の技術は普及しない。そこで、中国の経済力や技術力などの実情に合わせた環境対策が必要となる。

例えば、脱硫プロセスについては、わが国で広く普及している湿式石灰石膏法では、大量の水を使用し、コストも高いことから、大量の水利用において制限される中国においては適した技術とは言いがたい。また、中国においては脱硫後の廃棄物の有効利用も必要である。

このような観点から、中国ではバイオブリケット技術が注目されている(5)。バイオブリケットとは、粉炭と木質廃材、農業廃棄物などの植物繊維質バイオマスの混合物を高圧ブリケットングすることによって作成される。さらに、消石灰などの脱硫剤を添加することにより燃焼と共に脱硫も可能となる技術である。ここで使用するバイオマスは粘性のない石炭粉のバインダーとしての役割を果たすばかりでなく、着火性能の向上にも優れている。そのほかのバイオブリケットの特徴として次の点が挙げられている。

- 1) 煤煙の大幅な減少
- 2) バイオマス添加による燃焼効率の向上
- 3) バイオマスによる成型の容易化
- 4) 石炭使用量の減少に伴う二酸化炭素排出削減
- 5) 自己脱硫・脱硝・脱フッ素機能
- 6) 燃焼炉の改造が不要
- 7) 安価な脱硫コスト
- 8) 燃焼灰の有効利用

特に、燃焼灰の有効利用に関しては、中国で深刻化している砂漠化の対策として、土壌改良剤への利用が期待されている。脱フッ素機能に関しては、バイオブリケットでも 1400℃以上の高温で燃焼すると排ガス中にフッ化水素として放出されるが、民生用の燃焼炉ではこのような高温は考えられないことから十分に燃焼残渣に留まり、大気を汚染することはないと考えられている。

#### 4. おわりに

大気は世界につながっている。そのため、大気環境への影響の原因についても複合的で多様な様相を呈する。したがって、そのような大気環境による地上の生態系や建造物などへの影響も単純ではない。大気に含まれる化学成分の酸性度ばかりが主要素ではないことを本稿で訴えた。学術的には既に「酸性雨」と表現する研究者はいないが、社会的にも「酸性雨」という表現ではなく、実態を表現する名称にしたいものである。このことにより、「いわゆる酸性雨」に対する市民の本当の理解が得られ、さらにより合理的な対策も行えるものと期待される。

#### 参考文献

- [1] 平井英二, 丁子哲治, アジア地域における酸性雨の現状, 産業公害, 27 巻, pp.730-734, 1991
- [2] 宮崎元一, 丁子哲治, 酸性降下物, ファルマシア, 29 巻, pp.380-382, 1993
- [3] 丁子哲治, 地球環境の酸性化問題とその防止対策, エコテクノロジー研究, 1 巻, pp.76-85, 1995
- [4] 王勤学, 大坪国順, 中国における砂塵あらしの増加と土地利用変化, 土木学会誌, 85 巻, pp.64-67, 2000
- [5] 畠山史郎, 酸性雨, 日本評論社, 2003