大気汚染と酸性雨現象

Acid Deposition —Atmospheric Processes in Japan—

玉 置 元 則*

1. はじめに

大気汚染の程度を評価するためには、都市部における NO_x や SO_x あるいは粒子状物質濃度等の現況とその長期的傾向を把握すること以外に、これらの汚染物質が発生源または一般環境中で他の有害物質に姿を変えていないか、あるいは濃度は低くとも本来清浄であるべき都市部の背後地域にまで汚染が拡大されていないかを調べることもまた重要である。

これらのことを考慮してみると、ここ数年の大気汚染の主要な課題には、 NO_x を中心にした自動車排ガス、光化学スモッグに代表される二次的汚染物質、質と量の両面から把握すべき粒子状物質、さらには、地球的(グローバル)な規模の汚染が含まれると考えられる。

近年、北欧・北米を中心にして社会問題となっている雨水の酸性化：酸性雨現象には、これらの大気汚染の課題が濃縮して含まれているように思われる。

従来、降雨は大気汚染物質に対する浄化作用を果すとのみ考えられていたが、今日では、それが同時に雨水自体の汚染と土壌・水圏等への汚染を伴うと考えられるようになってきた。

大気汚染が進行し、雨水が汚染され、雨水の質的变化が起る。このことは単に雨水の酸性化の問題だけではなく、北欧・北米で進行している酸性雨による深刻な生態系の破壊を考えると、酸性雨現象を解明し、その対策を構想することは、大気汚染と雨水の質的变化を防ぐために、極めて重要であり、かつ急務と考えられる^{1)~6)}。

図-1 酸性雨現象のメカニズム

* 兵庫県公害研究所，主任研究員，工博 Motonori TAMAKI

2. 酸性雨現象とは何か

2.1 酸性雨現象により顕在化した大気汚染の影響の多様性と広域化

雨水の酸性化：酸性雨現象は、北欧・北米では、主に湖沼水の酸性化に基づく魚介類の死滅ならびに土壌の酸性化に基づく森林被害を伴う生態系の破壊へと進行している。この酸性雨現象によって、大気汚染の広域的な低濃度慢性曝露の影響に目が向けられるようになるとともに、降雨の大気汚染物質に対する浄化機能についても関心が強められている(図-1)。

近年、都市部周辺の大気汚染自体は軽減されたかもしれないが、より広域的な汚染としてひろがっており、さまざまな地域でその影響が現われている。その一つの形態が酸性雨現象である。自然の浄化作用はあるものの、排出された汚染物質に見あう量が、環境中に蓄積される。その警告として「酸性雨」があるのかもしれない。

本来、大気汚染は人間とそれをとりまく環境全体のわく内で把握されるべきものであり、酸性雨現象によって、都市部周辺での影響から、後背地も含めた環境全体への汚染の拡大に目がむけられるようになったと言える。したがって、酸性雨を含む雨水の質的变化は、CO₂濃度増加による地球の温度上昇、ハロカーボン、N₂O等による成層圏のオゾン層破壊等のグローバルな課題と類似の内容を有している。

なお、酸性雨の内容を規定するのは、大気汚染物質の長距離輸送、汚染物質の変質、雨水の酸性化、生態系破壊の4つの特徴である。

2.2 pHによる雨水の評価

「酸性雨」で表現されるように、大気汚染物質に基づく雨水の質的变化は主に酸性度によって評価され、指標としてpHが用いられている。

雨水が大気中の炭酸ガス等と平衡を保つ酸性度はpH 5.6程度である。大気中には、雨水をアルカリ性側に導びくと考えられる物質も存在するため、厳密にはpH ≒ 5.6を雨水のバックグラウンド値と言えない点があるものの、現在、pH 5.6以下の雨水は広い意味で「酸性雨」とされている。このなかでも、主に“被害”に結びつくのはpH 4以下の強酸性の雨であり、我が国ではpH 2.6という極めて低いpHを示す雨水も観測されている。しかし、pH 4以上であっても、酸性化した降雨に長時間継続して曝露され蓄積されれば、その影響は大きいものと思われる。

ここで注意しておかなければならないのは、pHは指標値であり、例えばpH 4とpH 5は値の上では1の差であるが、水素イオン(H⁺)濃度にすれば10倍の違いがあり、一般の汚染物質濃度の表示、1 ppm(ppb)や1 μg/m³と異なる点がここにある。

雨水の質的变化の程度は、雨量とそして溶解している各種有害物質の濃度から総合的に判断すべきである。しかしながら、一般的には、このように雨水の酸性度(pH)で評価されている。これは燃焼によって生成されるSO_xやNO_xのような気体状物質あるいは、その大気中での二次生成物が主に酸性の性状を有していること、動植物に与える総合的な影響ならびに測定の簡便さから考えて、指標として妥当であると思われる。

2.3 雨水に主に含まれている物質

通常の雨水は河川水や湖沼水とほぼ同じ性状をしているが、pHのみが低いのが特徴である。河川水や湖沼水のpHは7に近い値を示すが、都市部周辺の雨水のpHはおおよそ4.5である。

大気中のほとんどの汚染物質は程度の差はあれ、降雨により洗浄されるため、雨水中には、工場あるいは自動車の人為的発生源ならびに土壌、海塩粒子等の自然的発生源から発生される汚染物質がほとんど検出される。

我が国の都市部周辺で測定されたデータからは、雨水中のアニオンの総量に占めるSO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻の割合は高い。これらはそれぞれ大気中のSO_x、NO_x、HCl(NaCl)等からもたらされる。また、カチオンの総量に占めるH⁺、NH₄⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺の割合も高い。雨水の酸性化に影響を及ぼす雨水成分は主要には、これら10種足らずの成分と考えてよさそうである。

pH以外に、雨水の汚染度を知る尺度として、我が国では導電率が多く測定されている。これには雨水中のイオンの挙動が反映されるため、この値から雨水中のイオン性物質の総量に関する知見が得られる。

pHはカチオンとアニオンのバランスによって決まるため、同じpHの雨でもイオン強度、導電率が異なることが多く、イオン強度の小さな雨水でも低いpHを示す場合がある。したがって、土壌あるいは生態系へのインパクトを考える場合には、指標としてのpH、指標としての導電率の両者を組み合わせて見て行く必要がある。

また、酸性化は雨水だけではなく、雪も同じで、特に雪に溶けた物質は、春先に一挙に溶け出するため、

生態系に急激な影響を与えるアシッド・ショックという現象が起る。さらに雨水や雪(Wet)だけではなく、乾性の酸性降下物(Dry)による影響も同様に大きく、これをも含めて酸性降下物としてとらえた方がよいように思われる。Dryの影響には、一度植物に付着し、そこに降雨があった場合に、雨水をより酸性化させるステム・フローという現象も含まれる。

2.4 雨水成分の指標性

雨水の酸性化の指標はpHでなされており、雨水成分のなかでは NO_3^- の方が SO_4^{2-} より雨水の質的变化に対する指標性を、より有する傾向がある。これは、 SO_4^{2-} の方が時系列的にも地域的にも濃度変動が小さいためである。さらに、 Ca^{2+} や Mn^{2+} も雨水汚染の指標となる。

一方、雨水成分を用いて大気汚染の評価を行うことができる。とりわけ、大気中の NO_x 濃度とその化学反応が明らかにされるにつれ、雨水の酸性化との関係が注目されるようになってきており、雨水中の NO_x 系汚染物質は大気汚染評価の有効な指標となりうる。

その指標は、現在、大気中の個々の物質の濃度をもとにしてなされている大気汚染の評価を総合の評価として行う指標として、また、長距離輸送に伴う気塊の性状変化の指標として、更には、地上では測定しえない上層の大気汚染物質の分布状態の指標として有意義である。

2.5 雨水測定における採取法統一の重要性

大気汚染物質の測定においては、標準物質の発生・調製方法とともに試料の捕集法は極めて重要である。気体状物質においては、特殊・選択性を有する吸収液、吸着剤に工夫がこらされてきたし、粒子状物質においては、捕集剤としての濾紙の材質やインパクターの性能の改善に努力がはらわれてきた。雨水成分の測定においても、採取法(捕集法)は極めて重要である。

大気中の汚染物質の多くは降雨と降塵により除去される。そのため、雨水の採取法でも、降雨時のみ雨水を採取するWet only(湿性降下物、雨+雪)の採取と非降雨時の乾性降下物(Dry)も含めて採取する、Bulkの採取あるいはDryとWet別の採取がある。Bulkの採取は手間がかからないが、得られる情報量は制限をうける。

また、Wet onlyの採取では、降雨時のみふたが開くよう、ふたの開閉が自動化されている装置が多く用いられている。Wet onlyの採取では、一雨毎(Event)に全量採取する方法と雨水を分割採取する方法(分取)

に分けられる。分取では、主に容量別分取と時間別分取に分けられるが、我が国では前者の使用が多い。また、一日単位での採取も行われている。さらにフローシステムで連続的に雨水のpHや導電率が測定される自動測定器も開発されている。

我が国では、酸性雨問題が主に“人体被害”いう形で登場したことから、降雨初期の雨水の性状の把握が重要視されたため、初期降雨の容量別採取の装置が主に使用されてきた。それに対し、北欧・北米では生態系に対する影響が中心課題であり、長期的なデータの蓄積のために、一雨全量採取あるいはWet onlyやBulkによる一か月単位の採取が主に採用されてきた。

このようにして採取された雨水について電極法によりpHが測定され、イオンクロマト法、原子吸光法、比色法等により種々のイオン性成分が分析されている。

雨水の汚染の現状を正しく把握し、汚染機構を明らかにするためには、科学的に厳密な統一性ある測定法の確立が望まれる。今、我が国で一番求められていることは、同一方法で採取した雨水を同一方法で分析することによって得られる、国際的評価に堪えうる、互換性のあるデータの蓄積である。

3. 雨水酸性化のメカニズム

3.1 降雨による大気汚染物質の浄化作用

吸収・吸着、化学反応あるいは拡散による除去もあるが、都市部で長期間大気が停滞し、降雨が無いとしたら、大気の汚染の程度ははかりしれないものになるだろう。

大気汚染物質の大気中での浄化(除去)過程としては、1)降雨、降塵、2)有害な二次の物質への変化、3)植物、物質表面への吸収・吸着、4)上層での分解、5) N_2 、 O_2 等無害物質への変化等が考えられるが、5)の過程を除いては、何らかの形で動植物への悪影響が懸念される。

このような大気を浄化する一過程が一方では酸性雨をもたらしているのであるが、大気の浄化という立場から考えた場合、降雨による汚染物質の除去作用は一樣でないこと、ならびにその能力には限界があることは当然である。

大気中には浄化されにくい汚染物質が多数存在する。たとえば、窒素酸化物系の汚染物質では、二次的生成物である気体状硝酸(HNO_3)や粒子状硝酸塩(NO_3^-)の方が一次汚染物質である NO_x よりも雨水に取り込まれやすい傾向を示し、 NO_x の中では NO_2 の方が雨

水に溶け込みやすく、NOは雨水による洗浄作用をほとんど受けない。

NO_x系汚染物質の雨水による捕捉率が、一次汚染物質に対してよりも、その二次的生成物に対して高いことは、大気中のNO_xの循環系の解明の点から考えると、重要な示唆をしているように思われる。

3.2 大気汚染物質の雨水への取り込み過程

大気汚染物質が降雨により浄化される際の、雨水への取り込み過程は大きく分けて二つある。一つは雲内に取り込まれる過程であり、rainoutと言われ、長距離輸送された汚染物質も多く取り込まれる。一方、降雨が始まり、雲の下で雨滴に取り込まれる汚染物質の除去過程はwashoutと言われ、主にその地域の大気汚染物質を洗浄する。

この両者の汚染物質に対する作用機序は異なるが、現在のところ、雨水の酸性化に及ぼす両者の寄与率の地域的特性は明らかにされていない。

気体状物質の雨水への取り込みは、雨滴に対する溶解度等によって決められ、温度、pH、共存イオンの影響を受けやすい。気体状物質の多くは、雨水中で相当するイオンに変化するが、N₂やO₂のように気体状のまま存在したり、CO₂のように雨水中のイオンと大気中のガスとの平衡関係になるものもある。

一方、粒子状物質は粒径の大きいものほど慣性衝突により雨滴に取り込まれやすいが、粒径が非常に小さくなると、今度はブラウン運動により雨滴に取り込ま

れやすくなる。一番捕捉されにくい粒子の粒径は0.1 μm付近と考えられている(Green field gap)。粒子状物質に含まれている可溶性成分は雨水中にイオンとして溶け出すが、不溶性成分として雨水中に存在するものも少なくない。Na等はほとんど前者であるが、Ca等は両者の形で存在し、Feは後者が多い。

このようにして、取り込まれた大気汚染物質の中には、雨水中で新たな化学反応等を起すものも少なくない。

3.3 雨水の酸性度を決める物質

都市部周辺の雨水の酸性度は、前述のpH≒5.6に相当する酸性度に、化石燃料の燃焼等によりもたらされる一次的、あるいは大気中の化学反応に伴う二次的な酸性物質の溶解によって上積みされる。一次的な物質としてはSO_x、NO_x、HCl等が主に指摘されており、二次的物質としては、主に大気中の光化学反応で生成されるH₂SO₄(SO₄²⁻)、HNO₃(NO₃⁻)、あるいはアルデヒド類、過酸化物質等があげられている。

雨水の酸性化は、初期には大気中の汚染物質の濃度から推定して、ほとんどSO_xあるいはSO₄²⁻に原因していると考えられていたが、近年、大気中のNO_xの挙動が明らかにされるにつれ、雨水中にNO₃⁻イオンを与えるNO_xあるいはHNO₃の役割が重要視されだした(図-2)。

たとえば、McNaughtonは米国での測定データの解析から、雨水のpHは主要にはSO_xによって規定さ

図-2 大気中の窒素化合物の循環過程

れるが、季節によってはNO_xの果す役割の大きいことを示している。一方、Galloway等は、米国北東部での年平均値から、雨水の酸性度に対するH₂SO₄とHNO₃の最大寄与率を求め、1964～1979年の15年間にHNO₃の役割はH₂SO₄の役割に対して約50%増加したことを示し、HNO₃の役割の増大の根拠として化石燃料の使用に伴うNO_xの増加ならびにそのNO_xがSO_xより相対的に量が増加したことをあげている。

Durham等の計算結果では、HNO₃の吸収により雨水の酸性化が大きく進むことが示されている。

このような雨水中のNO₃⁻イオンの増加ならびに低pHの雨水中でNO₃⁻イオンが高濃度になることは、米国のロスアンゼルス近郊でも、さらには我が国でも観測される例が多く、HNO₃を含むNO_x系汚染物質が、大気のみならず、そこを落下してくる雨水の質的变化をもたらし、酸性雨現象に大きな役割を果たしている。

4. 汚染の広域化と生態系の破壊

4.1 大気汚染物質の長距離輸送

欧米では「酸性雨」は非常に古くから社会的な問題となっており、すでに19世紀後半から、科学者によって、acid rainという言葉が使われ、そのおおよその性状と特徴が指摘されていた。そして、これらは工場における化石燃料の使用によるものであると把握されていた。

1960年代に入ると、スカンジナビア諸国の酸性雨の原因が、数百～数千km離れた欧州各国から長距離輸送されて、移流してくる大気汚染物質にあり、酸性雨は広域的な現象であることが示されるようになった。このことも大きな理由の一つとなり、第1回国連環境会議がストックホルムで開催された。また、UNEP(国連環境計画)特別会議が「ナイロビ宣言」をまとめ、そのなかで「酸性雨等の大気の変化は、人間環境に対して一層深刻な脅威となっている」とし、開発途上国と一部先進国の大気汚染および長距離輸送の問題がクローズアップされたことは記憶に新しい。

このような国境を越えた汚染物質の長距離輸送に基づく酸性雨の実態を正しく把握し、その原因を究明し対策をたてるため、関係各国の協力が必要になっている。欧州ではOECD(経済協力開発機構)のLRTAP計画あるいは全欧を含むEMEP計画において、100か所以上での酸性雨の実測、SO_xの排出量の推定、大気汚染物質の長距離輸送モデル研究、移動量の試算等が

国際的な取り組みとして行われてきた。

同様の汚染物質の長距離輸送に基づく雨水の酸性化は北米・カナダでも指摘されている。

米国では、1980年にAcid Precipitation Actが成立し、これに基づく報告書では、酸性雨の主要な原因を人為的理由によるSO_xとNO_xに帰している。また、米国－カナダ間では酸性雨の越境汚染に対処する「越境大気汚染に関する会議覚書」が締結され、1986年3月には、レーガン・マルルーニー会談で、カナダが主張してきた「カナダの酸性雨禍は米国で排出されたSO₂によるものだ」を米国は認め、排出を減らすための研究に合意した。

また、欧州・カナダの10か国は自らを「30%クラブ」と称し、欧州・北米のSO_x排出量を現在より30%減少させる行動をすでに開始している。

4.2 森林と湖沼に見られる生態系の破壊

このような酸性雨の被害は主に生態系の破壊という形で現われている。北欧・北米での影響の実例を整理すると、一つは土壌の酸性化ならびに栄養分の溶出に伴う森林被害であり、いま一つは湖沼水等の酸性化に伴う魚介類の減少と重金属溶出による汚染である。

北欧では、1960年代後半において、pH 4～5の降雨により森林の成長が2～7%減少し、酸性化により湖沼水のpHが低下し、多くの魚類が死滅してしまったという。土壌の酸性化に関しては、北欧諸国では酸性の強いポドソル土壌が多いため、雨水の酸性が強くなれば、直線的に生産力の低下に結びつくという側面もあるようである。

土壌、水圏のpHが低下すると、りん酸イオンが溶解しにくくなり、Al、Mnイオンが溶解しやすくなり、酸性土壌は生物に必要な物質が欠乏し、有害物質を過剰に含むことになる。また、土壌の有機物の分解、土壌呼吸、酵素活性等が激減する。

西独では、全森林面積の半分以上に、異常の徴候が出ており、樹木に対する被害は年間800万ドルといわれ、その他に600万ドルもの農作物被害があるとされている。樹木に対する被害の原因としては、前述のように酸性雨により土壌から遊離したAlイオンが細い根に害を与えることあるいは、栄養塩が欠乏することが指摘されている。

さらに、米国・ニューヨーク州の湖でpHが6.6～7.2から3.9～5.8に低下し、魚類の75%が被害を受けたこと、カナダのオンタリオ州の多くの湖ではpHが4.5となり、魚はいなくなり藻の生育が貧弱になった

こと、スウェーデンではカビの菌糸が湖底に広がったこと、ノルウェーでは酸性化により金属類が溶出し、水中のAlイオン濃度が上ったこと等が酸性雨の被害として数多く報告されている。それ以外に、建造物の被害も多く指摘されている。

5. 我が国における酸性雨問題

5.1 「湿性大気汚染」

我が国の「酸性雨」問題は約15年前、関東地方で表面化した。これは人体被害あるいは植物被害という形で極めてドラマチックに登場した。

まず、昭和46年9月23日の夜、東京・代々木駅周辺で霧雨が降り、通行人が10数人、目に刺されるような痛みを感じたという。広域的には、昭和48年6月、静岡、山梨両県で霧雨が目にしみるとともに、一部にはのどの刺激やせき、さらにはネギ、タバコ、キュウリ、ナスの上部が茶褐色に枯れたと報告された。さらに昭和49年7月には栃木県を中心に関東一円に被害がひろまり、被害を訴えた人は3万人を越えた。その後、昭和50年5～7月に関東一円で被害が発生したが、以後、際立った被害の報告例はない。

環境庁は、この「酸性雨による被害」の内容と特徴から、「湿性大気汚染」と銘うって種々の調査を開始した。その後、類似の雨水調査は北海道から九州まで全国各地で行われている。

一方、昭和56年6月に関東地方に強酸性の降雨があり、群馬県の前橋でpH 2.86という強い酸性を示し、雨水中の汚染物質の濃度も極めて高かった。pH4未満の強い酸性を示す降雨は、ほとんどの地方で年に数回観測されており、データが蓄積されるにつれ、pH3未満の降雨でさえ、そう珍らしいことではなくなっている。

5.2 我が国での酸性雨による生態系の破壊

前述の我が国での酸性雨による“人体被害”を軽視するわけにはいかないが、ある程度大気汚染による急性被害と同次元の問題あるいは類似の現象として把握してもよさそうである。このような問題とは別に、今、国際的に問題になっているのは、主に国境を越えた大気汚染物質の長距離輸送に基づく酸性雨の長期的・慢性的曝露による生態系の破壊である。しかしながら、我が国の被害は定量化されていないだけかもしれないが、北欧・北米で指摘されている森林被害、水資源の被害は今のところほとんど報告されていない。

大気の汚染、雨水の酸性化は北欧・北米なみに進行

していると考えられるのに、北欧・北米のような生態系への影響が報告されていない理由として次のような点があげられ、その一部については、実験的あるいは理論的な検討が加えられつつある。

1) 我が国の土壌は酸性に強く、北欧・北米の酸性雨に敏感な地質とかなり異っている。2) 我が国の河川の勾配が急で、雨水から持ち込まれる汚染物質が河川に停滞することなく、すぐ海域まで運ばれる。3) 我が国の湖沼は、北欧・北米の湖沼のような閉鎖系のものが少なく、湖沼水の交換が速い等。また、別の指摘としては、我が国の湖沼は、 HCO_3^- による緩衝作用が維持される段階であり、あるバランスを越えると急激に酸性化し、死の湖になる可能性があり、今そのような剣が峰にあるのかもしれないと言われている。同じ緩衝作用は土壌についてもあてはまるが、生態系への影響は蓄積量によって決まるため、現在の降下量以外に1960～70年代の降下量が大きい意味をもってくる。

一方、我が国の脱硫技術の進歩等による大気汚染の程度の違いを指摘する向きもある。

最近、関東地方で、酸性雨による「杉枯れ」が指摘され調査が開始されている。もし、これが酸性雨による被害の一種であると実証されることにでもなれば、我が国の酸性雨問題は新しい局面を迎えることになる。また、酸性雨は大気汚染が本質的に有している現象の一つであることを考えれば、仮に「杉枯れ」が光化学オキシダントを含む大気汚染の影響によるものであっても、同様の意味を持つものと思われる。

さらに、一部では、「松くい虫」の被害についても、その責任の一端は大気汚染と酸性雨にあるとの指摘もあり、注目される。

5.3 我が国の雨水性状の特徴

それでは、我が国の雨水性状の特徴はどのようなところにあるのであろうか。関東地方で“被害”が報告された1970年頃から、我が国の多くの地点で主に容量別分取法による測定が行われてきた。そして、蓄積されてきたデータを解析すると、次のようにまとめることができる。

1) 我が国の都市部周辺の雨水のpHは主に3～6の範囲に出現し、平均値は4.5に近い(図-3)。観測されたpHの最低値は2.6である。pHの平均値は雨水の採取法によっても、平均値の算出方法によっても異なるから注意が必要である。

2) pHの季節的変動は不明であるが、夏期に低いpHを有する降雨の出現率が高い。また、平均値で見

（ H^+ 濃度の単純平均を基本として算出⁶⁾、文献6)の結果に
7)~43)のデータを加えて加筆・修正した。

の、年度、地域によるバラツキがある。また、夏期をた場合も、夏期の方が冬期よりやや低い傾向があるもの中心として、雨水の酸性化に及ぼす NO_x 系汚染物質の影響は大きい。なお、このような季節的変動は、米国と我が国では必ずしも一致していない。

3) 乾性降下物も含め一か月単位で採取するデボジット・ゲージ法によるpHの経年的な低下傾向は一部の地域で見られたが、雨水のみを採取してきたこの10年間のデータでは、明確なpHの低下傾向は示されていない。

4) 雨水中の SO_4^{2-} 濃度は季節的にも地域的にも変動は小さいが、 NO_3^- 濃度の変動は大きい。

5) 一雨内の雨水中成分濃度は、降雨量の増加とともに減少し、特に NO_3^- 、 Na^+ 、 Cl^- の減少量は大きい。pH(H^+)、 NO_2^- は必ずしもそのような傾向を示さない。都市部の雨水のpHは降雨初期に巾広い値を示すが、降雨量が増加すると、一定の値に収束する傾向がある。

6) 主に測定されている10種足らずのイオンで、雨水中のアニオンとカチオンのバランスはほぼとれており、これらの主成分によって雨水の性状が決められている。

7) 都市部の雨水の汚染は、 NH_4^+ や SO_4^{2-} によるよりは、 NO_3^- や H^+ により正確に評価される傾向がある。また、pHと導電率との関係から雨水の地域特性を示しうる。

8) 雨水中の Ca^{2+} イオンは都市部で高く、汚染の一つの指標となりそうであるが、 NH_4^+ とともに酸性を中和する役割を説明するには、まだデータ不足である。

9) 都市部の背後地の雨水でも、 NH_4^+ 等の成分は都市部なみの濃度で出現する地域が多い。また、背後地でもpHの低い地域が多い。

10) 大気中の粒子状物質は降雨により除去されるが、その除去率は化学成分によって異なる。 NO_3^- ならびに海塩粒子に含まれる成分の除去率は大きい。

11) SO_x 等は降雨時、濃度が減少するが、 NO_x は見かけ上、増加傾向を示すことが多い。この現象は、化学反応によって説明しうる。

6. まとめ

全国各地で多くの酸性雨調査が行なわれてきたが、酸性雨現象を解明するのに必要な地上データはまだまだ不足だと言える。雨水のpHは年々低下しているの

かという問題に十分答えられるデータを見つけるのは困難である。

雨水の酸性化により、我が国でも生態系への影響が起きているのかどうか判断することは大切なことであるが、それ以前に、雨水が人為的原因により汚染され、酸性化していることだけで、すでに問題であると言っても過言でないように思われる。

どういう過程で雨水が酸性化されるかは別として、雨水を酸性化しているのは、主に化石燃料の燃焼に伴う SO_x であり、 NO_x であり、かつその大気中での二次的变化物である。

酸性雨の影響は長期的に蓄積されてから現われることが多いため、被害が定量的に把握されてからでは、対策を立てるには遅すぎるかもしれない。

我が国でも、これらの認識の上に立ち、統一的手法で、広域的に恒常的な雨水監視測定網を確立し、それに基づいた長期的な対策を立てる必要がある。

引用文献

- 1) 玉置元則：我が国の雨水の化学的性状，環境技術，14，132 (1985)。
- 2) 玉置元則：大気汚染と雨水の酸性化（我が国の酸性雨の現状と課題），PPM，15 (3)，2 (1984)。
- 3) 玉置元則，他：大気中の窒素酸化物による雨水の質的变化（大気の浄化と雨水の酸性化），大気汚染学会誌，20，71 (1985)。
- 4) 玉置元則，他：雨水成分の分析法（基本操作と問題点），環境技術，14，462，574，611 (1985)。
- 5) 玉置元則：酸性雨測定法の問題点，環境技術，12，841 (1983)。
- 6) 玉置元則，他：わが国における雨水pHの年平均値，環境技術，15，188，215 (1986)。
- 7) 荒木邦夫，他：北海道公害防止研究所報，12，59 (1985)。
- 8) 今 武純，他：青森県公害調査事務所報，7，57 (1985)。
- 9) 早狩敏夫，他：青森県公害センター所報，6，90 (1983)。
- 10) 信太 稔，他：秋田県環境技術センター年報，11，82 (1985)；齊藤 学，他，同誌，12，94 (1986)。
- 11) 新潟県公害研究所，新潟県公害研究所業務年報，13，20 (1984)；新潟県環境保健部：新潟県湿性大気汚染調査報告書 (1986)。
- 12) 友部正志，他：茨城県公害技術センター年報，17，55 (1984)。
- 13) 栃木県公害研究所大気騒音部，栃木県公害研究所年報，9，4 (1985)。
- 14) 氏家淳雄，他：群馬県衛生公害研究所年報，16，116 (1984)；関口恭一，他，同誌，17，165 (1985)；第26回大気汚染学会講演要旨集，p349 (1985)；K. Sekiguchi，Environmental Technology Letters，6，391 (1985)。

- 15) 埼玉県公害センター, 埼玉県公害センター年報, **11**, 109 (1984); 水上和子, 他, 同誌, **12**, 38(1985).
- 16) 小山 功, 他, 東京都公害研究所年報, 90(1985); 古明地哲人, 他, 同誌, 94(1985), 13(1986).
- 17) 神奈川県環境部: 昭和59年度酸性雨測定結果報告(1985).
- 18) 鶴田治雄, 他, 横浜市公害研究所報, **10**, 25(1985); 河村太郎, 第22回衛生化学技術協議会年会講演集, 166 (1985).
- 19) 清水源治, 他, 山梨県衛生公害研究所年報, **28**, 50(1984).
- 20) 鈴木恒雄, 他, 静岡県衛生環境センター報告, **27**, 151 (1984).
- 21) 北村守次, 他, 石川県衛生公害研究所年報, **21**, 94 (1984), 同誌, **22**, 98(1985).
- 22) 伊藤光雄, 昭和59年度愛知県環境保全担当職員研究発表会資料, p1 (1984); 伊藤光雄, 他, 愛知県公害調査センター所報, **13**, 30(1985).
- 23) 日本気象協会東海本部, 尾鷲地域における降雨汚れ調査報告書(1983).
- 24) 山田 豊, 他, 京都府衛生公害研究所年報, **29**, 104 (1984).
- 25) 田口圭介, 第26回大気汚染学会講演要旨集, p331 (1985); 国川隆治, 他, 同誌, p335 (1985).
玉置元則, 他, 兵庫県公害研究所研究報告, **17**, 1, 95, 97(1985); 平木隆年, 他, 同誌, **17**, 6(1985); 光木偉勝, 他, 同誌, **17**, 42(1985); 玉置元則, 他, 大気汚染学会誌, **21**, 132 (1986).
- 27) 松本光弘, 他, 奈良県衛生研究所年報, **19**, 63(1985).
- 28) 井川良幸, 他, 和歌山県衛生公害研究センター年報, **31**, 29(1985).
- 29) 重田勇夫, 他, 京都市公害センター年報, **6**, 61(1985); 徳田純夫, 他, 同誌, **6**, 78(1985).
- 30) 松本光弘, 他, 第24回日本公衆衛生学会近畿地方会口演要旨集, p145 (1985); 田中靖志, 他, 同誌, p146(1985); 谷尾桂子, 他, 同誌, p147(1985).
- 31) 豊沢澄治, 他, 岡山県環境保健センター年報, **9**, 90 (1985).
- 32) 山口幸裕, 他, 全国公害研協議会中四国支部第12回大気部会研究発表会要旨集, p1 (1985); 楠 憲一, 他, 同誌, p5 (1985); 大原真由美, 同誌, p9 (1985); 豊沢澄治, 同誌, p12(1985).
- 33) 小西壽久, 他, 徳島県保健環境センター年報, **3**, 95 (1985).
- 34) 三木正信, 他, 香川県公害研究センター所報, **9**, 97 (1984).
- 35) 三谷美嶺雄, 他, 愛媛県公害技術センター所報, **6**, 1 (1985); 楠 憲一, 他, 同誌, **7**, 1 (1986).
- 36) 川村速雄, 他, 高知県公害防止センター所報, **1**, 105 (1984).
- 37) 吉村賢一郎, 他, 長崎県衛生公害研究所報, **25**, 91, 97 (1983); **26**, 130, 135 (1984).
- 38) 井村義弘, 熊本県衛生公害研究所報, **14**, 32(1984).
- 39) 木村和義, 岡山大学農学研究, **60**, 39(1982).
- 40) 土器屋由紀子, 第26回大気汚染学会講演要旨集, p330 (1985).
- 41) 田中和郎, 他, 宮城県保健環境センター年報, **3**, 153 (1985).
- 42) 押尾敏夫, 千葉県公害研究所研究報告, **16**, (1), 13 (1984).
- 43) 小畑聡子, 宮崎県公害センター年報, **8・9**, 80(1985).