

第 7 章

7

総合評価

## 第7章 総合評価 目次

企画部環境推進担当 部長 朝倉 一雄  
粕江研究所大気科学部長 上席研究員 藤田 慎一  
粕江研究所大気科学部 上席研究員 佐藤 一男

7 - 1 酸性物質の広域輸送 .....	83
7 - 2 酸性物質の環境影響 .....	84
7 - 3 今後の課題 .....	85



朝倉 一雄（1971年入所）  
火力発電所の排ガス拡散実態調査，排ガス  
拡散予測手法および石炭火力発電所微量物質  
の環境影響評価など，発電所の大気環境影響  
評価に係わる研究を行ってきた。現在，企画  
部で，地球温暖化問題や微量物質対策など，  
環境研究全般にわたる総合推進の業務を担当  
している。

藤田 慎一（8ページに掲載）

佐藤 一男（34ページに掲載）

## 7 - 1 酸性物質の広域輸送

### (1) 東アジアの降水化学

東アジアの降水組成は、上層風や降水量などの気象条件と、前駆物質の排出源分布の二つに大きく支配されている。その質的な変化を検討するとき、AP： $[nss-SO_4^{2-} + NO_3^-]$ とNP： $[nss-Ca^{2+} + NH_4^+]$ の値はよい指標になる。大陸北部の降水はNP > APの関係が成立し、APは高いがNPは相対的にさらに高い。これは硫酸や硝酸を中和するのに十分な量のカルシウムやアンモニアが、定常的に降水中に供給されていることを意味する。このため、アジア最大のSO<sub>2</sub>排出域の後背に位置するにもかかわらず、酸性度の強い雨は降っていない。太平洋上の降水はNP < APの関係が成立し、APは低いがNPは相対的にさらに低い。このため発生域から離れているにもかかわらず、年間を通して酸性度の強い雨が降ることになる。

西日本地域における降水中の $nss-Ca^{2+}$ 、 $NH_4^+$ 、 $nss-SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ の各濃度は、寒候季に高く暖候季に低くなる傾向がある。 $NO_3^-$ 濃度と $NH_4^+$ 濃度の増加は顕在化しており、過去10年間の増加率は約45%に達する。これに対して $nss-Ca^{2+}$ 濃度と $nss-SO_4^{2-}$ 濃度には、明瞭な経年変化は認められない。降水の酸性化に及ぼす硝酸の寄与は経年的に増加しており、東アジアにおけるNO<sub>x</sub>排出量の増加がこれに深く関与している。

### (2) わが国における硫黄の収支

1980年代後半の日本列島を対象に、硫黄化合物の収支を解析した。推計された人為排出量は約435 GgS yr<sup>-1</sup>、湿性沈着量は約620 GgS yr<sup>-1</sup>、乾性沈着量は約430 GgS yr<sup>-1</sup>である。沈着量/排出量の比率は地域的に異なるが、日本全体をみると、みかけ上、全沈着量はこの地域からの排出量を約2.4倍上回る。硫黄化合物の収支には天然排出源、特に火山活動も大きく関与している。だがその分布は地理的に偏在しており、噴煙の流

出経路は季節的に大きく変化する。寒候期の日本海側でみられる高濃度の原因を、火山活動で説明することは風系的にみても困難である。

### (3) 酸性物質の広域輸送

ハイブリッド型の広域輸送モデルを開発し、わが国に沈着する硫黄化合物の排出源の寄与率を計算した。予測されたわが国の沈着量は、観測値の80%強であり、多くの地点で両者はよく一致する。日本全域で見ると、全沈着量のうち人間活動による影響が40%、火山の影響が20%、大陸の影響が40%を占める。寒候期の日本海側では、季節風の影響により大陸の影響が80%を超える。

広域輸送モデルによる計算結果の妥当性は、他のモデルとの比較計算によって裏付けられた。台湾電力公司/台湾大学との共同研究や当研究所の提唱による国際プロジェクト(MICS-ASIA)により、複数の広域輸送モデルを用いて硫黄化合物の輸送計算を行い、モデル間の整合を調べた。その結果によると、個々の結果には当然違いはみられるが、発生-沈着関係を含めて予測結果の大まかな特徴は一致している。濃度や沈着量の予測精度は、空間解像度や降水量の評価に大きく支配されることがわかった。

国際応用システム分析研究所と共同で、わが国における酸性物質の沈着量の将来予測解析ツールTRAJECを開発した。将来のSO<sub>2</sub>排出量について、現状規制シナリオにおける2030年の全沈着量は、1995年に比べて約20%増加する。中国の2030年のエネルギー消費量が1995年の2.7倍に、SO<sub>2</sub>排出量が3.5倍になるという悲観的なシナリオでは、日本海側で硫黄の沈着量が2倍になる地域が生じる。わが国における硫黄沈着量の増加に関与するのは、主に朝鮮半島の西にある渤海湾と黄海を囲む領域からの排出量の増加である。

## 7 - 2 酸性物質の環境影響

### (1) 森林への酸の総沈着量

群馬県の実験林（スギ人工林）を対象に，大気から樹冠への $H^+$ の沈着量を推定した。降水による湿性沈着量は $0.52 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，4種の酸性ガス（ $SO_2$ ， $NO_2$ ， $HNO_3$ ， $HCl$ ）による乾性沈着量は $0.72 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となり，総沈着量は $1.24 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と推計された。この値は森林土壌や湖の酸性化が喧伝される欧米の沈着量に匹敵するものである。一方，欧米に見られない特徴として， $H^+$ の乾性沈着量に占める $HCl$ の寄与がかなり大きい（19%）ことがあげられる。

### (2) 森林土壌への影響

前記の実験林を対象に，土壌 - 植生系における $H^+$ の収支を推定した。大気からは湿性 + 乾性沈着，大気由来の $NH_4^+$ の葉面吸収と土壌中での硝化により合計 $3.1 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の $H^+$ が負荷されている。これに対し，系の内部ではその5.2倍（ $15.9 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）の $H^+$ が自然のプロセスで生産されている。さらに，両者を合わせたすべての $H^+$ は，土壌からの豊富な塩基の放出や植生のアニオン吸収により，系内で完全に中和されていることがわかった。

酸性岩（花崗岩，流紋岩）を母材とする土壌が分布する広島県南部の25地点を対象に，深さ50 cmにおける土壌溶液の $BC/Al$ 比を調べた。その結果， $BC/Al$ 比は1.5 ~ 440の範囲にあり，いずれの地点もヨーロッパでの閾値1を上回った。そこで， $BC/Al$ 比が1となる $H^+$ の上乗せ量を試算した結果， $0.77 \sim 15.8 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となった。これらの値は，同地点における $H^+$ の総沈着量（およそ $0.7 \text{ keq ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）と同レベルかそれ以上である。

### (3) 陸水への影響

山地流域で普遍的にみられる中和反応は，陽イオン交換と鉱物風化である。両者を定量的に分別する方法を考案し，手取川水系の中宮流域，吉野川水系の東谷流域，天竜川水系の陣が畑流域，アメリカ・アディロンダック公園内のウッズ（Woods）流域の四つに適用

した。中宮流域と東谷流域における主要な中和反応は，方解石の風化である。陣が畑流域ではケイ酸塩鉱物，とくに斜長石の風化が中和に働いている。一方，鉱物の風化速度が小さいウッズ流域では，風化と陽イオン交換では中和しきれない $H^+$ が流出し，湖水の酸性化を招いている。

以上の結果から，酸性化のおそれのある流域条件としては，石英や白雲母などの風化しにくい鉱物を多く含み，風化層が薄い（10 m以下）ため鉱物の風化速度が小さく（ $1 \text{ kmol ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 以下），風化による $H^+$ の中和量と $H^+$ の沈着量の比が小さい（10以下）流域と考えられる。

鉱物風化の重要性はモデル計算でも裏づけられた。アメリカの電力研究所（EPRI）が開発したILWASモデルを東谷流域に適用し，河川水質の長期予測を行った。その結果，現状レベルの $H^+$ の沈着が100年間続いても，河川水質は安定しており酸性化は起こらない。一方，方解石の風化がまったく起こらないと仮定した場合は，数十年後に酸性化の兆候が現れ，その後徐々に酸性化の進むことが予測された。

### (4) 樹木への影響

樹木を対象に人工酸性雨の暴露実験を行った。可視害の発現 $pH$ は樹種によって異なり，針葉樹の場合は3.0 ~ 2.5の間，広葉樹では4.0 ~ 3.0の間にある。生長反応についても，針葉樹のほうが広葉樹よりも耐酸性は強い。土壌に無施肥の状態で人工酸性雨を暴露すると，硝酸の施肥効果により生長促進がみられる。針葉樹の場合は，土壌の $BC/Al$ 比が1以下になってもほとんどの樹種に顕著な生長低下は認められないが，落葉広葉樹の場合は生長低下の割合が樹種によって大きく異なる。人工酸性雨にオゾンを複合させると，個体の生長量は増加するが，光合成産物の分配のアンバランス化が加速される。

以上の結果から，現状の酸性雨では可視害や生長抑制などの直接影響が発現する可能性は極めて小さい。また，衰退地点の土壌理化学性を考慮すると，土壌酸

性化が衰退原因である可能性も小さいと考えられる。

つぎに、オゾンとSO<sub>2</sub>の暴露実験を行った。生長低下を引き起こすオゾンやSO<sub>2</sub>濃度は、樹種によって大きく異なる。生長低下を指標とした場合と可視害を指標とした場合とでは、オゾンやSO<sub>2</sub>の濃度の閾値は異なる。オゾンに感受性の高い樹種では、現状のオゾン濃度でも生長への影響が懸念されるものがある。SO<sub>2</sub>濃度が常時20 ppb以上になると、SO<sub>2</sub>の単独影響が懸念される樹種がある。現状濃度のオゾンと10 ppbより高い濃度のSO<sub>2</sub>の複合暴露によって生長低下の程度が増大する。

以上の結果から、現状ではSO<sub>2</sub>の樹木影響は極めて小さい。しかしSO<sub>2</sub>濃度が常時20 ppb程度になると、SO<sub>2</sub>の直接影響とオゾンとの複合影響が発現する危険性は高くなると考えられる。

#### (5) コンクリート構造物への影響

水セメント比(W/C)が60%、80%、100%のモル

タル試験体を製作し、模擬酸性雨による暴露実験(総雨量約9000 mm)を行った。一般のモルタルはW/C 65%が上限なので、80%、100%は品質をかなり低下させたモルタルである。模擬酸性雨のpHは2.5、3.0、4.0、5.6の4段階とした。

モルタル表面の浸食量は、pHが4.0以下になると増加し始め、pH 3.0以下で急激に増大する。モルタル内部への影響は、pHが2.5の場合やモルタルの品質が非常に不良の場合に顕著である。曲げ強度は、モルタルの品質が悪くpHが3.0以下の場合に若干低下する。表面の色調は、pHが5.6、4.0では気乾状態と大きく違わないが、pHが3.0、2.5ではかなり赤褐色化する。

わが国の酸性雨のpHは、低い場合でも4.0程度であるから、通常のコンクリート構造物では、50年程度の耐用年数の間に酸性雨が経年劣化を著しく促進させることはない判断される。

## 7 - 3 今後の課題

以上の研究結果を総合的に判断すると、酸性物質の濃度や沈着量が現状のレベルで推移する限り、近い将来、わが国の環境に大きな変化が現れる可能性は小さい。しかし将来的に濃度や沈着量が大幅に増加することがあれば、その可能性は必ずしも否定できない。

酸性雨問題の解決を図るためには、その監視、評価、削減対策に総合的に取り組む必要がある。酸性雨の監視については、わが国の提唱のもとに始まった東アジア酸性雨モニタリングネットワークが本格的に稼働した。国際的に統一された手法に基づく科学的な基礎データは、酸性雨現象の共通理解に役立つものと考えられる。酸性雨の評価については、海外の研究機関も参入して広域輸送や環境影響の調査研究が行われている。これらの客観的な評価を通じて、東アジアにおける酸性雨の現況や将来が一層の確度で明らかにされつつある。その結果をふまえて、各国の国情に合った環境対策の探索が行われていくことになる。わが国は、数々の環境問題を克服した環境立国として、対策技術の支援・移転を一層強力に進める必要がある。

一方では、化石燃料の消費による地球温暖化が進行しており、CO<sub>2</sub>の排出削減を確実に実行することが、21世紀の人類にとって最重要課題である。環境負荷を軽減するエネルギー対策の基本は、CO<sub>2</sub>排出量の少ない電力供給技術、省エネルギー、省資源化技術などのCO<sub>2</sub>削減対策である。先進国は主体的にこれらの対策を実行するとともに、途上国との共同活動によるCO<sub>2</sub>削減に取り組む必要がある。こうしたエネルギー対策への取り組みが、酸性雨問題の解決にも寄与する。

これまでは酸性物質の越境大気汚染やCO<sub>2</sub>による地球温暖化が問題であったが、21世紀には水銀など微量物質の広域輸送も顕在化する可能性がある。

当研究所は、今後も継続して、各種の化学物質を対象に広域輸送の評価、森林生態系における循環機構の解明、植物への複合影響の解明などに取り組む計画である。また、国際的な研究ネットワークの一員として、酸性雨問題の検討の場に参画し、技術的な知見の提供や共同研究の活動に努めることにより、問題解決に貢献したいと考えている。