

第 1 章

1

**酸性雨問題の変遷と  
当研究所の取り組み**

## 第1章 酸性雨問題の変遷と当研究所の取り組み 目次

粕江研究所大気科学部長 上席研究員 藤田 慎一

1 - 1	酸性雨問題の始まり .....	9
1 - 2	アジアの酸性雨 .....	12
1 - 3	当研究所の取り組み .....	15



藤田 慎一（1975年入所）

酸性雨課題推進担当として、当研究所の酸性雨研究を統括するとともに、大気物理学と化学に関する研究を分担してきた。現在は、大気中での硫黄酸化物や窒素化合物の収支と濃度の経年変化に関する研究を進めている。

## 1 - 1 酸性雨問題の始まり

### 1-1-1 はじめに

産業革命が成熟した19世紀中ごろのイギリスは、生産活動が著しく進展した反面、大都市や工業地域で環境問題が深刻化した時代であった。ロンドンなど大都市では、石炭の燃焼により排出される二酸化硫黄( $\text{SO}_2$ )や降下ばいじんは、凄まじい大気汚染を引き起こした。化学工業の分野では、原料として大量のソーダ灰を必要とした。ソーダ灰の製造方法として、ソルベー法はまだ工業化されておらず、ルブラン法によって副産される塩化水素( $\text{HCl}$ )は、深刻な環境汚染を招いた。マンチェスターなど工業都市の後背地では、緑林は枯れ果て「死海の辺」のように荒廃したといわれる。

ソーダ産業による環境汚染に音を上げた政府は、1863年にアルカリ法を制定し、アルカリ監督官のポストを新設した。その初代に任じられたのは、王立協会会員の化学者アンガス・スミスである。1872年に出版された大著『大気と降水』<sup>(1)</sup>のなかで、スミスは酸性雨を意味するacid rainの術語を初めて用い、酸性のガスや雨が綿布を脱色し、構造物や金属を腐食し、農作物に被害をもたらした事例を示した(図1-1-1)。

スミスの時代、酸性雨の原因物質は $\text{HCl}$ と $\text{SO}_2$ であった。 $\text{HCl}$ による環境汚染を解決に導いたのは、ソルベーが工業化に成功した当時の先端科学技術であり、アルカリ法を初まりとする近代的な環境法の制定である。だが石炭の燃焼による大気汚染に有効な解決策は見出せず、その後も事情は好転しなかった。抜本的な大気汚染の改善は、苦いスモッグ事件を幾度も経験して、1956年に大気清浄法が制定されるまで待たねばならなかった<sup>(2)</sup>。

降下ばいじんと $\text{SO}_2$ を相手に悪戦苦闘している間に、新たな環境問題が現れた。モータリゼーションの発展により、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )が汚染物質として登場したこと。広域規模の輸送現象が発見されたことである。火の手は1960年代の終わり、北海を挟んだ対岸のスカンジナビアにあがった。

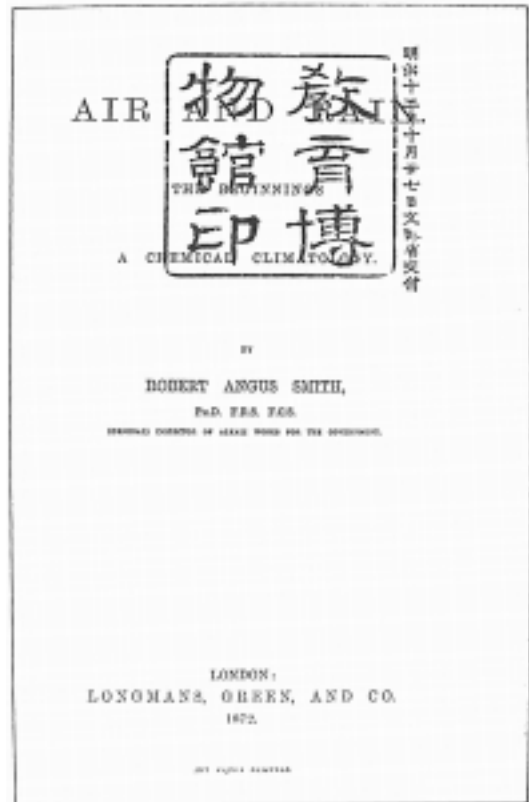


図1-1-1 スミス著『大気と降水』(1872)の中扉(国立国会図書館蔵)

### 1-1-2 ヨーロッパの酸性雨

同じころドイツでは、別の視点で降水の分析が行われていた。降水に含まれる $\text{NH}_4^+$ や $\text{NO}_3^-$ などの窒素化合物は、作物の栄養源として農学者の興味を引いた。その提唱者は農芸化学の始祖であり、スミスの師でもあるリービッヒである。大気中には作物の生育に必要な量の窒素分があるから、肥料として与えることはない。リン酸塩とアルカリだけ施せばよいと考えたのである。この学説を検証するためリービッヒは、1840～1860年代に各地で降水の分析を行った<sup>(3)</sup>。その影響はドイツにとどまらず、ヨーロッパの各国、そして科学技術の揺籃期の日本にもおよんだ。

なかでも精力的な研究が行われたのはイギリスであ

った。ロザムステッドに農事試験場を創設したロースとギルバートは、長期間にわたる実験を行なった。彼らの後継者は、リーピヒの学説を正して窒素肥料の必要性を説き、窒素化合物として $\text{NH}_4^+$ と $\text{NO}_3^-$ とが同じように有効なことを示した。

ドイツのホーエンハイムの農事試験場から駒場農学校（東京大学農学部の前身）に招請された農芸化学者ケルナーも、窒素化合物の供給源に興味をもった一人である。1883～1885年にケルナーは、東京で降水の分析を行なった<sup>(4)</sup>。ケルナー論文を今日的な眼で見ると、わが国の生産活動が小さかった時期に、 $\text{NH}_4^+$ や $\text{NO}_3^-$ の濃度を定量した点に価値が見出される。当時のヨーロッパの学術誌に何回か引用されるなど、その意義は小さくなかったと推察される。窒素化合物の供給源として、当時もっとも注目されたのは降水であった。これに対する答としてケルナーは「降水量は絶対量の尺度でない」ことを、気候条件が異なる東京とロザムステッドのデータの比較により結論したのである。

ヨーロッパの降水化学は、第2次大戦後に新たな展開をみる。スウェーデンの土壤学者エグナーは、栄養塩の循環を調べるため、国内に多数の採取器を設けていた。この観測網は1956年に、大気大循環の研究で有名なロスビーが主宰するストックホルム大学の気象学教室に移管され、後に欧州大気化学観測網（EACN）とよばれるネットワークの中核となる。ロスビーとエグナーは「化学気候学」という分野を提唱した。そして多地点で採取した降水を分析し、気圧配置など気象条件との関係について説明を試みた<sup>(5)</sup>。同僚のエリクソンは、硫黄化合物の収支の研究に先鞭をつけた。

化学気候学の術語は、ロスビーらが最初に提唱したものではなく、アンガス・スミスが『大気と降水』を著わしたときの副題でもあった。だがその内容は80年間にだいぶ変っていた。スミスの時代の降水化学は、スポット的な観測が中心であり、濃度分布を面的にとらえる発想はまだなかった。19世紀の終わりになり、大気汚染が深刻化すると、セントバーソロミュー病院の化学者ラッセルは観測網の考え方を導入し、デポジットゲージとよばれる統一規格の採取器を考案して降水を分析し、濃度分布の地図を作った。だがその広さは、水平距離で数十kmの範囲にとどまった。20世紀の中ごろロスビーらの時代になって、ようやく成分濃度

と気象擾乱との関係が議論されるようになったのである。観測網の整備と拡大とが、研究の進展に貢献したことはいうまでもない。

スカンジナビアの観測データを解析したスウェーデンの土壤学者オデンは、この地域の降水は酸性化の傾向を強めており、その原因は海をわたってイギリスやドイツから輸送された $\text{SO}_2$ にあるに違いないと確信する。同じころスウェーデンの西海岸では、多くの湖が酸性化して水棲生物に影響を与えていることも判明した。オデンらの進言を受けたスウェーデン政府は、1972年にストックホルムで開催された国連の「人間環境会議」でこれを提起する。アンガス・スミスが『大気と降水』のなかで化学気候学の始まりを宣言し、酸性雨の環境影響を論じてから、奇しくも100年目の年であった。

スウェーデン政府が人間環境会議に提出した報告書<sup>(6)</sup>は、賛否両論の大きな反響をよんだ。隣国のノルウェーは好意的であり、指弾されたイギリスやドイツは冷淡であった。原因究明に乗り出した経済開発協力機構（OECD）は、1972年に11か国の参加のもとに、長距離越境監視評価に関する協力計画（LRTAP）を発足させた。オデンらの主張を確認するためには、越境大気汚染を定量的に評価する必要があった。このためヨーロッパを対象に、長距離輸送モデルの「原版」を開発し、排出量と沈着量の収支を国ごとに算定した<sup>(7)</sup>。

また1977年には、国連の欧州経済委員会（ECE）の協賛をうけ、東ヨーロッパを含む16か国の参加のもとに、欧州監視評価計画（EMEP）が発足した。ヨーロッパ各国はこのプロジェクトにより、同一の観測マニュアルに基づいてモニタリングを実施し、原因物質の排出量データを共有し、長距離輸送モデルを用いて越境大気汚染を評価することになった。こうしてエグナーらがスウェーデンで始めた小規模な観測は、30年後にはイベリア半島から旧ソ連国境までを網羅する大規模な観測ネットワークへと発展する。

実態調査の結果、降水の酸性化がほぼヨーロッパ全域を覆う現象であり、湖沼の生態系の衰退とも関係することが確認された。ところがOECDが行なった数値実験の結果、ヨーロッパ各国の間には越境大気汚染が交互する結果が得られたことから問題は複雑化した。各国は自国の環境対策と併行して、対外的な対応も迫られたからである。

1979年に開催されたECEの環境担当相会議には32か国が参加し、長距離越境大気汚染条約（1983年発効）を採択した。この条約に基づき1985年には、ECEに属する21か国の署名のもとに、ヘルシンキ議定書（1987年発効）を採択した。議定書を批准した国は、通称「30%クラブ」とよばれるSO<sub>2</sub>の削減協約、つまり各国における1980年時点の排出量の最低30%を1993年までに削減することが義務付けられた。さらに1988年には、ECEに属する25か国の署名のもとに、ソフィア議定書（1991年発効）を採択した。議定書を批准した国は、1994年までに各国のNO<sub>x</sub>の排出量を、1987年時点のレベルに凍結することが義務付けられた。

具体的な削減方法は各国に任された。矢面に立たされたのは、電気エネルギーの供給を石炭火力発電所に頼ってきた各国の電気事業である。だが各国の内情は相応に複雑であった。電気エネルギーをおもに原子力に依存するフランスは、当初から酸性雨にあまり関心を示さなかった。排出国の一つと指弾された旧西ドイツも最初は冷淡であった。ところが国内の森林衰退を目の当たりにしてから態度を急変し、もっとも熱心な排出削減の推進国となった。イギリスはヘルシンキ議定書を批准したが、対外的には削減率をなかなか約束しなかった。国内的には電力庁の民営化問題も抱えていた。電気エネルギーをおもに水力に依存するスカンジナビアには、もともと大規模な石炭火力発電所はなかった。だが、原子力発電の凍結という国内事情により、スウェーデンはその不足分を何に求めるかの選択を余儀なくされる。

1980年代の終わりに怒涛のように始まった東ヨーロッパの崩壊は、排出削減がまがりなりにも走り出していたヨーロッパの酸性雨を錯綜するものにした。西ヨーロッパを凌駕するといわれながら、なかばペールに包まれていた大気汚染の実態が露見したからである。旧チェコスロバキア、ポーランド、旧東ドイツの国境地帯にある森林は、ほとんど壊滅状態にあることが判明した。

### 1-1-3 北アメリカの酸性雨

1970年代になると、酸性雨への関心は北アメリカでも高まった。過去の分析データを解析したライケンズ

らは、北アメリカでも酸性化の兆候がみられると主張した。1976年にカナダは降水観測網（CANSAP）を設け、広域モニタリングを開始した。その背景には、国内に沈着する酸性物質の一部が、アメリカから越境したのではないかという懸念があった。

一方のアメリカでは、1978年に国家大気物質沈着計画（NADP）が発足し、1980年には全米酸性降水影響評価計画（NAPAP）の傘下に大規模な調査が始まった<sup>(8)</sup>。SO<sub>2</sub>の排出源は五大湖の南東部に集中しており、酸性化が著しいのは五大湖の北東部であった。1980年にアメリカとカナダは「越境大気汚染に関する合意覚書」を交換する。カナダは、自国の湖沼生態系の衰退は明らかだから、硫酸と硝酸の沈着量が1 haあたり20 kgを下まわるよう、排出源側で対策を講ずるべきだと主張した。これに対してアメリカは、ソースとレセプタの関係は科学的に説明されたものではないとして、自国の排出源に抑制を求めるには、なお調査・研究が必要だという態度を最後まで崩さなかった。

1983年に30%クラブが発足すると、カナダはこれを上まわる50%の削減計画を打ち出した。アメリカは事実上これを無視した。当時アメリカでSO<sub>2</sub>の70%近くを排出したのは、石炭火力発電所であった。だが日本とは違ってアメリカには電力会社が数百もあり、なかには環境対策にすぐ費用を投じられない零細なものもあった。矢面に立たされた電気事業は、電力研究所（EPRI）を中心に精力的な調査を開始した<sup>(9)</sup>。

国内で大議論が交わされたにもかかわらず、1987年に発表されたNAPAPの中間報告書は「酸性雨の影響は小さい」という消極的なものであった。レーガン政権は、酸性雨法の立法に対して後向きの姿勢に終始した。1989年に発足したブッシュ政権はまもなく、SO<sub>2</sub>排出量の大幅削減を骨子とした大気浄化法の改訂に乗り出す。そしてカナダを訪問して、国内の環境対策を具体的に進める約束をし、10年以上にわたる政策論争はひとまず決着をみた。

このように排出削減をめぐる経緯は、ヨーロッパと北アメリカとは事情が異なった。小国が陸続するヨーロッパの進め方は、科学論争の結論を全部待たないで、政治決着の形で方向を定めたものであった。臨界負荷量の評価など、研究の一部は将来の課題として残された。これに対して本質的に2国間の問題であるア

アメリカは、莫大な人・物・金を投じて調査を先行し、その結果をふまえて国内法を改訂した。

いずれにせよ、排出削減が国際的な合意のもとに走り出したヨーロッパや北アメリカでは、酸性雨問題は収束にむかい始めた。1990年代になると、環境問題の関心はもっぱら地球温暖化に向けられるようになった。

EPRIをはじめとする電気事業の研究機関も、プロジェクトの規模を縮小した。酸性雨は先進国から途上国の問題と見なされ、生産活動の進展が著しい東アジアに世界の関心が集まり出した。国内の環境対策に見通しを得たアメリカは、極東地域の環境安全保障のカードに酸性雨を使って、中国を牽制し始めた。

## 1-2 アジアの酸性雨

### 1-2-1 はじめに

ケルナーが1892年に帰国した後、降水の分析は農商務省の農事試験場の手に移った。東京西ヶ原の本場と畿内、九州、陸羽の各支場では、川島禄郎の指導により、1913年から20年間近くにわたって大規模な調査が行われた<sup>(10)</sup>。

降水の化学組成は、農芸化学のほか林学、公衆衛生学、気象学などの分野でも関心事であった。鉱煙による森林の被害は、当時大きな社会問題であり、鍋木徳二などの林学者によって精力的な調査が進められた。早くから工業化が進んだ阪神地域では、日本のマンチェスターとよばれた大阪の大気汚染がまず深刻化した。1918年に大阪市は、鍋木徳二にヨーロッパの大気汚染の調査を委託する。その結果、市立衛生試験所では1920年から降下ばいじん量の測定が始められた。この調査は第2次大戦末期に中断したものの、70年以上にわたって続けられてきた。大阪市は、全国に先駆けて1932年に「ばいじん防止規則」を制定し、その後の各都市における活動のきっかけを作った<sup>(11)</sup>。

第2次大戦後、大気汚染が再燃するなかで、降下ばいじん量の測定は他の都市にも広がった。イギリス規格に準拠したデポジットゲージが用いられ、気象条件を考慮して採水瓶の大きさに工夫がなされた。溶存成分の分析も順次始められた。熊本や四日市では、1960～1970年代にかけてpHが経年的に低下したことも報告されている<sup>(12)、(13)</sup>。

1930年代になると、気象学の分野でも降水化学に関

心が集まるようになった。1933年に中央気象台の倉茂英次郎<sup>(14)</sup>は、測候関係が将来研究すべき項目を調査し、その一つに「各地の降水の酸性度とそれが産業におよぼす影響」をあげている。中央気象台は1935年に化学掛を新設し、三宅泰雄の指導のもとに降水の分析を開始した<sup>(15)</sup>。第2次世界大戦末期に中断した調査は、戦後の早い時期に再開された。だが気象行政の整理・統合のなかで、まもなくほとんどの地点で打ち切られた。最後まで残った神戸海洋気象台でも、1961年をもって約25年間にわたる観測の幕を閉じた。

気象庁が岩手県三陸町の綾里で降水の分析を再開したのは、約15年をおいた1976年である。この調査は世界気象機構の勧告を受けて、大気バックグラウンド汚染観測網(BAPMoN)の一環として始められたものである<sup>(16)</sup>。綾里はその地域観測所として出発したが、1994年に日本では初めて南鳥島に基準観測所が設けられ、CO<sub>2</sub>濃度や大気混濁度とならんで降水の分析が始まった。

### 1-2-2 日本の酸性雨

わが国の酸性雨は、ヨーロッパや北アメリカとは少し違った形で出発した。1973年と1975年の梅雨の時期、関東地方の住民の多くから眼や皮膚の痛みを訴える届け出があった。植物や農作物の一部には可視障害もみられた。被害地域で酸性度の強い降水が観察されたことから、濃度や組成に関心が集まり、環境庁や自治体によって調査が行われた。その結果、被害はホルムアルデヒドや過酸化水素など刺激性物質と、水素イオンとの相加作用によると推定された。だがその全体像は、

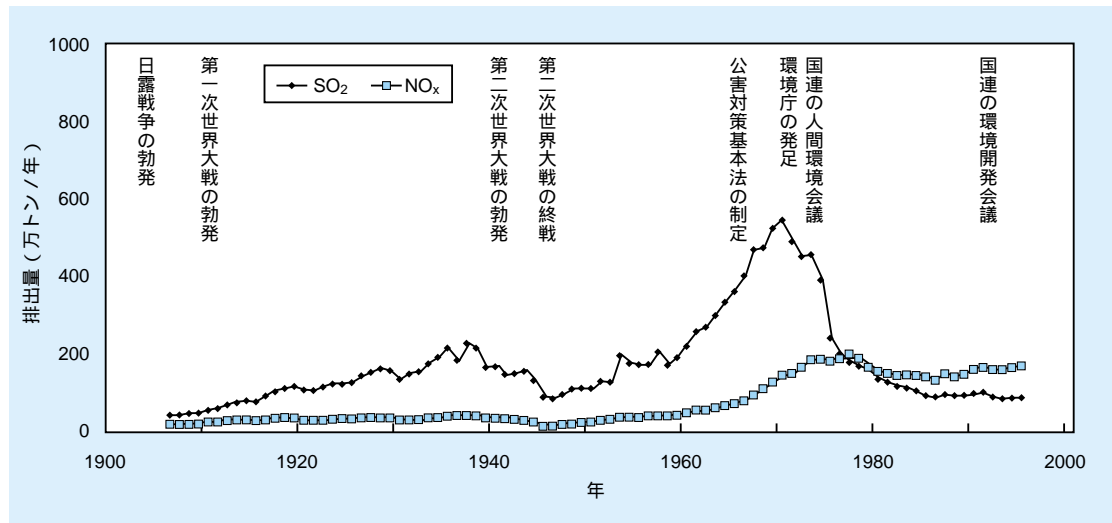


図1-2-1 わが国における過去100年間の二酸化硫黄と窒素酸化物の排出量の推移

完全に解決せずに残された。皮肉なことに、環境庁が5か年計画で調査を開始した1975年の夏を最後に、被害は聞かれなくなった。わが国ではこの一連の事件をさして「湿性大気汚染」、あるいは酸性雨とよんできた<sup>17)</sup>。

湿性大気汚染が起きた1970年代のわが国は、1960年代に深刻化した公害問題をうけて1968年に大気汚染防止法が制定され、SO<sub>2</sub>排出量が急激に減少し始めた時代と符合した(図1-2-1)。同じころ欧米で喧伝された越境大気汚染は、まだ問題視されてなかった。当時として世界を先行した環境保全対策と、独特の気象条件や地理要因もあいまって、広域的な被害は将来的にも生じないという見方が支配的であった。上層には偏西風が吹くこと、海に囲まれた島国であり物質が滞留しにくいこと、酸性物質に対して緩衝能をもつ土壌が多いこと、閉鎖性の湖沼が少なく陸水の交換が早いことが、あまり明確な根拠なくその理由とされた。

ところが1986年に、群馬県衛生公害研究所の関口恭一<sup>18)</sup>が関東地方でみられるスギ衰退を報告し、その原因として酸性雨を指摘したことから事情は一変した。原因不明のスギ衰退とオキシダント指数の分布はよく対応することも分かり、環境庁と林野庁は緊急調査を行った<sup>19)</sup>。これに先立って環境庁は、1983年に酸性雨対策検討会を設置し、環境影響が顕在化したときに備えて5か年計画で「第1次酸性雨対策調査」を開始していた。その結果、全国の多くの地点に欧米なみの酸性物質が沈着していることが分かった<sup>20)</sup>。

環境庁の第1次調査は1987年度に終了し、翌1988年

度からは5か年計画で「第2次調査」に引き継がれた。国設大気測定局に自動計測機と自動開閉型の採取器を設置し、濃度の連続測定と降水の分析とが行なわれた<sup>21)</sup>。

第2次調査は1993年度に終わり、1994年度からは酸性雨の未然防止を目標に掲げた「第3次調査」が5か年計画でスタートした。新たに離島に酸性雨測定所を新設するなど、観測網の拡充・強化が図られた。第3次調査の『中間とりまとめ』は1997年4月に発表された<sup>22)</sup>。このなかでは、日本海側で冬季にSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の上昇が認められ、大陸の影響が示唆されること。アルカリ度の低い湖沼が確認され、数値実験の結果では、早い場合30年後に酸性化する可能性があること。原因不明の樹木衰退が引き続き確認されることなどが指摘された。陸水の酸性化は、当研究所の見解<sup>23)</sup>と異なるものであったが、『最終とりまとめ』の段階で訂正された。

環境庁の第1次調査を実質的に支えたのは、自治体の試験研究機関であった。1988年に始まった第2次調査では、観測地点が国設大気測定局に切り替わったため、有力な自治体を中心となり行政枠を越える形で全国を5ブロックに分け、広域モニタリングを開始した。梅雨など特定の気象条件を選び、第1次調査と同じ「ろ過式採取器」を用いて集中観測を行った。全国公害研協議会の傘下に、全国100地点以上からなる独自のネットワークが展開された<sup>24)</sup>。

当研究所では、硫黄化合物の輸送や収支の解析を目的に、1987年から全国規模のモニタリングを開始した<sup>25)</sup>。1990年以降は西日本地域への集中化を図り、あわせて

当研究所が主宰する東アジアのネットワークに組み込んだ。統一手法のもとに実施された共同観測としては、東アジアで最初のものであるが、所期の目的を達したため1996年9月をもって足掛け10年にわたる調査の幕を閉じた。

### 1-2-3 東アジアの酸性雨

1980年代になると、酸性雨への関心は東アジア各国でも高まった。中国における酸性雨の調査は、1970年代の終わりに試行的に始められ、重慶など西南地域の都市では、予想よりも酸性化は著しいことが判明した。同じころ行われた北京や南京の調査では、酸性化の兆候はみられないが、硫酸や硝酸の濃度は高いことも分かった<sup>26)</sup>。

1982年に国家環境保護局は「全国第1回酸性雨会議」を開催し、その結果を受けて第6次5か年計画の一環として1983年から2年間、四川省と貴州省で「第1次調査」を行った。その結果、都市の酸性雨は深刻な状況にあることが確認された。平坦な北東地域と比べると大気の変換時間は長く、降水量は多く、土壌の酸緩衝能は弱いことがその理由とされた。第1次調査をふまえて、1985年からは第7次5か年計画の一環として「第2次調査」が行なわれた。国家環境保護局が作成した観測マニュアルをもとに、28省区に約200地点からなる大規模な観測ネットワークが設けられた。華南3省区では重点観測も行われた。その結果、降水の酸性度の強い地域は局地的なこと、酸性度は年々上昇の傾向にあること、農作物、森林、建築物などに被害を生じていることが判明した<sup>27)</sup>。

1990年以降は、第8次5か年計画のもとに、華中7省で調査が行われた。その結果、湖南省の長沙など華中地域の酸性雨が深刻なこと、巨視的にみると酸性化は東へ拡大していること、環境被害には大気汚染物質の直接影響も関与していること、酸性化の原因は石炭燃焼に起因するSO<sub>2</sub>にあることが確認された。行政当局は石炭の硫黄分の低下、住宅暖房のガス化、環境アセスメントの実施などの環境対策を策定し、その一部は実行に移されてきた。

韓国における酸性雨の調査は、1970年代の終わりにソウルと蔚山で行われたのが最初である。1980年に国

立環境研究院は、ソウル地域に18か所の観測局を設けて予備調査を行った。1984年には『酸性雨測定網運営指針』が制定され本格調査が始まった。観測局の数はその後も増加し、自動開閉型の採取器への切り替えを進めるなど、ネットワークの整備・拡充が図られた。観測局の総数は、1995年には全国39都市・92地点に達した<sup>28)</sup>。黄砂襲来時の降水組成の研究や、長距離輸送モデルの開発も始まった。ソウルにおける降水のpHは、夏季にやや高く冬季にやや低くなる傾向がある。工業都市の蔚山では、1993年以降のpHに上昇の傾向が認められる。残念ながら北朝鮮の状況はよくわからない。

台湾における酸性雨の調査は、行政院環境保護署によって1984年に始められた<sup>29)</sup>。西海岸の台中にアジア最大級の石炭火力発電所を建設中の台湾電力公司も、独自の調査を進めてきた。1990年には環境保護署によって、離島を含む10地点に観測局が設けられた。代理表面法による乾性沈着量の測定が行われていることは特筆される。調査結果によると、酸性度の強い降水はおもに北部で春季に発現する。硫酸と硝酸の濃度はこれと似た季節変化を示す。東アジアを対象にした長距離輸送モデルの開発も、台湾大学などで進められている。台湾の大気質に影響をおよぼすおもな排出源は、季節風が卓越する冬季は上海付近に、また梅雨季は華南地域にある。1995年5月には、台北で「東亜地区酸雨国際研究会」が開催された<sup>30)</sup>。

東南アジアでは、19世紀の終わりにオランダ、イギリス、フランスなど旧植民地の宗主国による降水の分析が行なわれたものの、酸性雨モニタリングは東アジアと比べて遅れた。ロザムステッドの農事試験場のミラーは、1913年に発表した論文のなかで、アンガス・スミス以来50年間にわたる世界各地の分析値を集成した<sup>31)</sup>。そのなかにはジャワ、カルカット、ハノイなどの興味深いデータが掲載されている。植物の生育が旺盛な熱帯の情報が、窒素化合物の供給源を知るうえで必要とされたためである。1970年代になるとBAPMoNの一環として、東南アジアにも観測地点が設けられた。欧米の研究機関の協力をうけて、既往のデータの再解析も始められた。マレーシアやタイの主導のもとに、「南・東・南東アジア酸性雨ネットワーク」(ARNSESEA)を構築する動きもあった。

このようにアジアの各国は、独自に国内のモニタリ



ングを進めてきた。だが試料の採取や分析の方法はまちまちであり、ヨーロッパのEMEPや北アメリカのNAPAPのように、国際的に標準化されたものではなかった。こうした背景のもと、アジア地域に共通の観測ネットワークを構築する必要性の声が高まり、国連環境開発会議、環日本海環境協力会議、エコアジア環境相会合などの場で議論されてきた。

わが国の環境庁は、1992年に「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)」構想を提唱した<sup>37)</sup>。そ

して構想の実現に向けて4回の専門家会合を開催し、技術マニュアル原案の策定を進めた<sup>38)</sup>。1997年2月に広島で開催された第4回会合で合意の形成がなされ、本格稼働までの暫定ネットワークセンターは新潟に置かれた。1999年に始まった環境庁の「第4次調査」では、国設観測網の見直し作業などが進められた。2001年1月、EANETは国連環境計画の傘下に10か国が参加して本格稼働を開始し、酸性雨研究センター(ADORC)がそのコーディネータに指名された。

## 1 - 3 当研究所の取り組み

### 1-3-1 はじめに

わが国の電気事業では、環境保全を経営の重点課題に位置づけ、地域社会との共存を図ってきた。火力発電所の建設にさいしては、事前に広範な環境アセスメントを行なって環境の保全や保護につとめ、化石燃料の使用にあたっては、良質な燃料の利用、さまざまな環境対策の実施、燃焼方式の改善を積極的に進めてきた。発電の過程で生じる副産物や廃棄物の処理・処分についても、素材としてリサイクルの割合を広げるなど省資源化に努めてきた。

ところが、環境問題をとりまく情勢は1980年代の終わりに大きく変化した。地域社会の枠を越えた広域規模の問題に関心が集まり、エネルギーと環境との調和が強く求められるようになったのである。こうしたなかで当研究所は、1980年代の初めに研究に着手し、まず植物影響と降水化学の課題に取り組んだ。1987年には通商産業省からの受託研究が発足し、所内研究と受託研究を連動させる形で、酸性物質の沈着量、スギ衰退の実態、山地流域での物質移行、表層土壌の酸緩衝能などの研究をフェーズI(1987~1992年)として進めた。東アジア各国との共同観測も、世界に先駆けて開始した<sup>33)</sup>。1993年からはフェーズII(1993~1997年)として、「硫黄化合物が関与した酸性雨」の研究を展開した<sup>23)</sup>。

### 1-3-2 硫黄化合物が関与した酸性雨の研究

まず広域的な観測ネットワークを独自に構築して、日本列島の硫黄化合物の収支を調べた。その結果、硫黄化合物の総沈着量は、みかけ上、人為起源のSO<sub>2</sub>の排出量を2倍以上上まわることが分かった。硫黄化合物の起源を明らかにするため、独自の長距離輸送モデルを開発して解析した。国内に沈着する硫黄化合物のうち、国内の人為起源に由来するものは約40%、火山活動に由来するものは約20%、国外の人為起源に由来するものは約40%と推計された。

環境の酸性化が顕在化している欧米では、河川・湖沼の水質変化を予測するモデルが開発され、環境対策の策定に利用されている。EPRIが開発した流域の酸性化予測(ILWAS)モデルをもとに、鉱物の風化速度や植生作用などに仮定をおき、わが国でもっとも影響が生じやすいと考えられる流域条件を設定して長期予測を行った。その結果、現状レベルの酸沈着量が続くかぎり顕著な酸性化は生じない。だが沈着量が現在の2倍程度になると、その累積効果によって、長期的には酸性化が起こり得ることが分かった。

樹木に対する酸性物質の影響を評価するため、代表的な樹種を対象に暴露実験を行い、可視害の発現や乾物生長の変化を調べた。わが国でみられるスギ衰退には、オゾンと水ストレスの影響が複合的に関与している可能性が高い。また、現状レベルより高濃度のSO<sub>2</sub>が

負荷されたときには、乾物生長の低下する樹種がいくつかある。このため、仮に東アジアでSO<sub>2</sub>濃度が大幅に上昇することがあれば、オゾンとの複合作用によって、いくつかの樹種に影響のおよぶ可能性はあることが分かった。

森林土壌に対する酸の臨界負荷量の研究は、ヨーロッパで始められ、東アジアにも適用が試みられてきた。当研究所では、可能なかぎり実測データを評価に反映させることを方針に、群馬県の表層土壌の臨界負荷量を推定した。推定した値は、世界銀行の酸性雨プロジェクトRAINS-Asiaの値より約1桁高いものであった。土壌酸性化にともなう影響発現の閾値は、ヨーロッパの方法を踏襲して塩基とアルミニウムの濃度比を1とした。だが、人工酸性雨を用いた暴露実験の結果によると、この値は樹種によって異なるため、わが国の森林生態系を考慮した閾値の設定や評価モデルの整合性について、さらに検討が必要なが分かった。

酸性雨の構造物影響については、社会的な付加価値が高いコンクリート構造物を対象に検討を進めた。短期間の実験で化学的劣化を評価する促進試験の方法はないため、水和物の分解や強度に関する長期的な評価は難しい。だが表面侵食量などは、降雨量との関係で評価が可能なが分かった。このため、より明確な傾向が判断できるまで、5年間の長期暴露実験を開始した。

以上の成果は、1996年11月に東京で開催した国際セミナー「酸性物質の輸送と影響評価」の場で国内外の関係者に紹介された<sup>23)</sup>。1997年12月は、酸性雨に関心をもつ多くの分野に参加をよびかけ、東京で公開セミナー「酸性物質の広域輸送と環境影響」を開催した<sup>24)</sup>。

### 1-3-3 窒素化合物が関与した酸性雨の研究

1980年代までの酸性雨は、先進国が集まるヨーロッパや北アメリカの環境問題であった。だが国際的な排出協約が走り出した結果、問題は収束にむかい始めた。これに対して、今後発展が予想される東アジアでは、重要な環境問題として大きく浮上するようになった。国内問題の立場に固執してきた中国も、量的な評価はともかく実態として、広域的な物質輸送が存在することに表立って反対しなくなった。

EANETは2001年1月に本格的な稼動を開始した。第6回酸性雨国際会議は、アジアでは初めて2000年12月につくばで開催された。東アジアの酸性雨に世界の関心が集まり、その解決に日本の貢献が求められるようになった証といえよう。独り日本が最新の環境対策を施せばよいという時代ではなくなったのである。研究課題の中心もSO<sub>2</sub>からNO<sub>x</sub>、湿性沈着から乾性沈着、実態把握から現象のモデル化というように変化した。RAINS-Asia<sup>25)</sup>に代表されるように、酸性雨の全体像を一貫したモデルで捉え、実効ある環境対策に役立てようという社会科学型の研究も志向されるようになった。

環境問題の発現が予測されたとき、あるいは既に発現しているとき、ソースとレセプタの関係性を定量的に説明し、科学の成果を対策の実現に反映させる筋道は避けて通れない。両者を介在するのは、大気圏・水圏・地圏・生物圏における物質輸送と物質循環という基本原理である(図1-3-1)。相手国に対策の実現を迫るうえで、厳密な科学的裏付けが要求されるのはもちろんであり、1980年代にアメリカがカナダに反論したのもこの点であった。一方で科学的な結論を待って対策を講じたのでは、往々にして遅すぎるのも確かであり、ヨーロッパは政治決着で方向を定める道を選んだ。21世紀を迎え排出量の増大が予測される東アジアでは、今後の選択肢について議論が展開されることになる。

こうした趨勢をふまえて当研究所では、1997年からはフェーズIII(1997~2000年)として、「窒素化合物が関与した酸性雨」の研究を展開してきた。研究の目標は「広域輸送の評価」「環境影響の評価」「総合評価」の三つである(図1-3-2)。広域輸送の評価では、大気

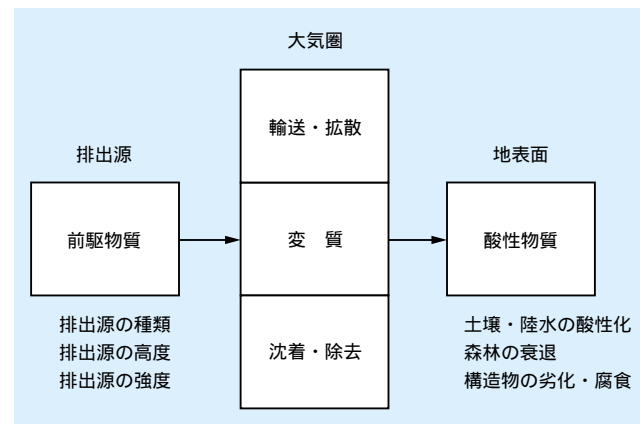


図1-3-1 環境大気中における酸性物質の輸送過程

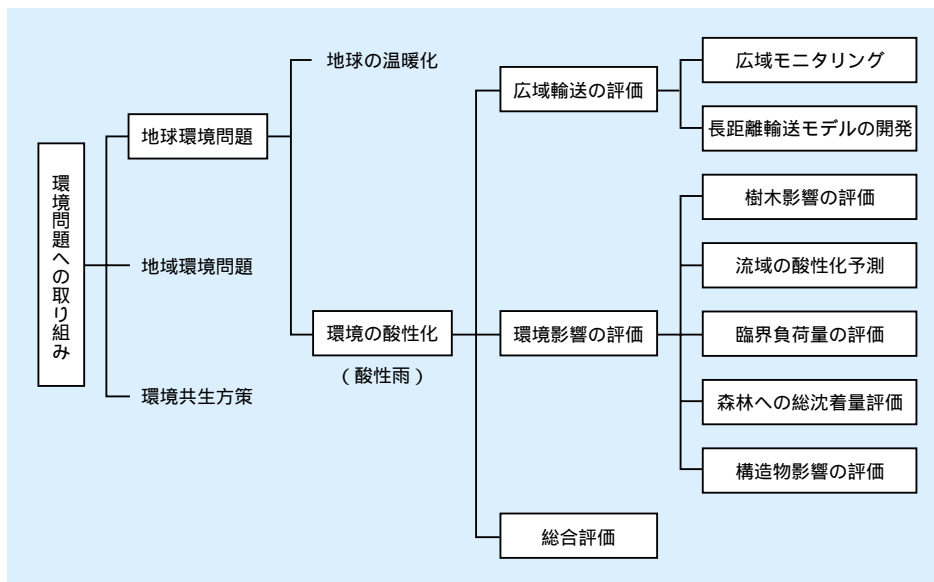


図1-3-2 電力中央研究所における酸性雨研究の展開

圏を対象に窒素化合物の動態を観測し、排出から沈着までの過程をモデル化する。環境影響の評価では、地表面に沈着した酸性物質が、地圏・水圏・生物圏を循環する過程を追跡し、環境が許容し得る負荷量を評価する。あわせて構造物影響や、樹木衰退におよぼす複合要因を解析する。総合評価では、将来のエネルギー需給を分析し、排出量の推移をシナリオ化して沈着量の変化を予測する。こうして酸性雨の全体像を明らかにし、施策に資する判断材料を提供することが目標で

ある。

人類が直面する経済 (Economics)、エネルギー (Energy)、環境 (Environment) の三つのEのトレードオフは、しばしば「トリレンマ」の名でよばれる<sup>96)</sup>。トリレンマを解決するためには、環境の分野を切り離すことなく、三つの分野の叡智を結集して総合的に取り組む必要がある。当研究所では、酸性雨の研究で培った知見を活用し、アジアの環境問題の解決にむけて貢献していきたい。