

中国四川省における酸性雨について

大歳 恒彦

1. はじめに

酸性雨の深刻な地域はヨーロッパの中・北部、北米の東部及び中国の一部といわれており、大気中の二酸化硫黄や窒素酸化物が酸化、粒子化し、生じた硫酸塩、硝酸塩が雲や雨に取り込まれて生じる酸性雨は発生源から1000kmを超える広がりを持った現象である。スウェーデンやノルウェーでは1950～60年頃から多くの河川、湖沼で酸性化が進み、魚がいなくなるなど水生生物に被害が顕在化してきた。また、1970年代にはカナダとアメリカの国境付近で湖沼の酸性化、森林被害が起こった。北欧の場合にはイギリス、ドイツなどの工業地帯から、カナダの場合には五大湖周辺の工業地域などから発生する酸性物質がそれぞれ原因となったとされている。ヨーロッパでは1979年に国連欧州経済委員会の長距離越境大気汚染条約の枠組みの中で、酸性雨のモニタリング、原因物質排出量データベースの作成、長距離輸送の解析などが行われた結果、1985年に締結されたヘルシンキ議定書により二酸化硫黄の排出量を1993年までに1980年と比べて30%削減することが決められた。一方、アメリカとカナダでも酸性雨のモニタリングが実施されるとともに1980年には米国酸性降下物評価計画が発足し、アメリカでは1990年の大気浄化法の改正によって二酸化硫黄の年排出量を1980年レベルより1000万トン削減することになった。これらの対策の結果、ヨーロッパ連合については1990年から94年の5年間で、二酸化硫黄は27%、窒素酸化物は10%削減され、一方、アメリカについては1986年から95年の10年間で二酸化硫黄は37%、窒素酸化物は14%削減された¹⁾。このように欧米では大気汚染物質の排出量が着実に削減された効果があらわれ、ヨーロッパ及び北米の23カ国が参加している河川・湖沼の酸性化評価モニタリング国際協力計画(ICP Waters)の最近のデータからは、表層水の酸性化からの回復の様子がうかがわれる²⁾。大部分の測定地点にお

いて硫酸イオン濃度の減少傾向がみられており、その減少傾向は1980年代よりも1990年代において顕著であったが、過去20年間における大気からの硫黄沈着量の減少率は50%にも上っている。窒素については1980年代は硝酸イオン濃度の増加が見られた年代として特徴付けられるものの、1990年代にはほとんど変化が見られていない。特に酸性雨などの環境影響を受けやすいと考えられている高地にある非森林帯の湖沼では、pHと酸中和容量(ANC, acid neutralizing capacity)の明らかで確実な回復が観察されている³⁾。

このように欧米において排出削減などの効果があらわれているのに対し、アジアにおける酸性物質の排出量は増加傾向をたどっている。世界銀行がアジア地域を対象に、エネルギー消費のシナリオを作成し、そのシナリオに応じて酸性物質の発生から沈着、生態系の影響までの評価を行うRAINS (Regional Air pollution INformation and Simulation) -ASIAではアジア地域における二酸化硫黄及び窒素酸化物の排出量の予測を行っている。1990年以降は全体の半分以上を占める中国からの二酸化硫黄の排出量が当初の予測よりも下回ったことにより、アジア全体の二酸化硫黄排出量も頭打ちになっているものの、毎年平均して5%程度の増加率を保っている。窒素酸化物については、二酸化硫黄よりも絶対量は少ないが、より高い増加率を示している。図1にはStreetらによるアジア地域の二

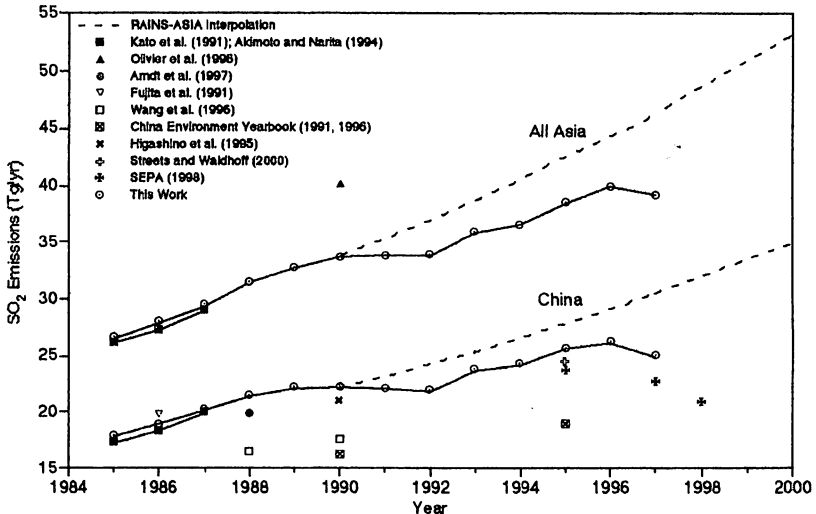


図1 アジア地域における二酸化硫黄排出量の推移、1985-1997⁴⁾

酸化硫黄排出量の経年変化の調査結果を示した⁴⁾。

2. 中国における酸性雨問題

中国における酸性雨の分布区域は広範で、その原因も複雑である。酸性雨の見られる区域は、近年来ほぼ安定してきており、主に長江以南、チベット高原以東の広大な地区及び四川盆地に分布している。華中、華南、西南及び華東地区にも酸性雨汚染の深刻な区域があり、また北方地区においては局地的に酸性雨が見られる。酸性雨区域の面積は、国土面積の30%を占めている。全国106都市における降水pH値モニタリング結果によれば、降水年間平均pH値は、4.3～7.47の範囲にあり、降水年間平均pH値が5.6未満となっている都市は43ある。1999年の全国における排ガスのうち、二酸化硫黄の排出総量は1857万トンとなっており、その内工業からの排出量は1460万トン、生活からの排出量は397万トンである⁵⁾。

中国政府では増大する酸性雨及び大気汚染への対策として、1995年に全国に酸性雨規制区域及び二酸化硫黄規制区域の「二規制区域」を定めた⁶⁾。二規制区域は表1に示すように全二酸化硫黄排出量の約60%をカバーしている。様々な措置の実施を通じて、1999年までに二規制区域内では、併せて80万トン近くの二酸化硫黄を削減している。主な対策としては、炭鉱の整理や、硫黄を高濃度に含む石炭の年間生産量を約2200万トン減少させたこと、約200万キロワットの小型火力発電の停止、小型のセメント工場・石油精製工場、小型高炉などの整理が行われた。また、電力及び石炭という二つの重点業界においても、その二酸化硫黄汚染防止計画を完成させている。

表1 二規制区域の特性 (1995) ⁶⁾

項目	二酸化硫黄規制区域	酸性雨規制区域	二規制区域
面積、%	3.0	8.4	11.4
人口、%	9.7	30.9	40.6
GDP、%	18.2	44.2	62.4
SO ₂ 排出量、%	25.4	33.5	58.9

3. 四川省の概況 7)、8)

・人口と産業

四川省の人口は1999年において全国第3位の8358万人であり、重慶市の3072万人を合わせた人口の約9割が四川盆地に生活している。四川盆地では農業及び工業ともに盛んであり、特に工業は豊富な鉱物資源、水力資源にも支えられて、西南地区における最大の工業基地である重慶をはじめ、機械、食品、化学工業、冶金、紡績の五大工業体系を成している。天然ガスも豊富であるが、四川省におけるエネルギー消費の約70%以上(1993年)は石炭によっている。石炭の硫黄含有率は3~5%であり、二酸化硫黄の排出量が多い。

・地理的な特徴と気候

四川省西北部は高度3500m以上の高原、東部は典型的な盆地である四川盆地、西南は2000mの山地となっている。東部盆地では温暖な気候であり、全年平均気温は14~19℃、1月の平均気温は5~8℃、7月の平均気温は26℃以上である。盆地内では雲天率が60%以上と高いため、年間日照時間は同緯度の東部よりも600時間少ない1000~1500時間である。盆地での年間降水量は900~1200mmであり、盆地中央部は盆地の周囲に比べて降水量が少ない。盆地では夏~秋期(5~10月)の降水量が全体の約80%を占めており、冬期(12~2月)は2~5%にすぎない。全体に風が弱く、西部高原においても2~3m/sであり、盆地内では1~2m/sの平均風速である。

・土地利用と植生

1995年の統計によれば、四川省及び重慶市を合わせた国土面積の約4割が林地、約3割が牧草地、約1割が耕地と分類されている。有林地は2割程度であるが、地理的な多様性を反映して中国でも最も豊かな植生を成している。森林の優勢樹種は地域により23種類にも及び、森林面積の約7割は冷杉などの針葉樹林が占めている。

4. 四川省における酸性雨の実際

・酸性雨の測定体制

四川省及び重慶市では図2に示す主要19都市(成都市、重慶市、綿陽市、南充市、攀枝花市、樂山市、自貢市、瀘州市、内江市、宜賓市、徳陽市、西昌市、遂寧市、万縣市、峨眉山市、雅安市、涪陵市、达川市、広元市)の約60地点において酸性雨の観測を行ってきた。この内14都市は酸性雨規制区域に指定されている。降水は国家標準法に従い、直径40cm高さ20cmのバケツを1.2m以上の高さに設置して、降雨毎に捕集している。pH及び含有成分の測定も国家標準法に従って実施されている¹⁰⁾。

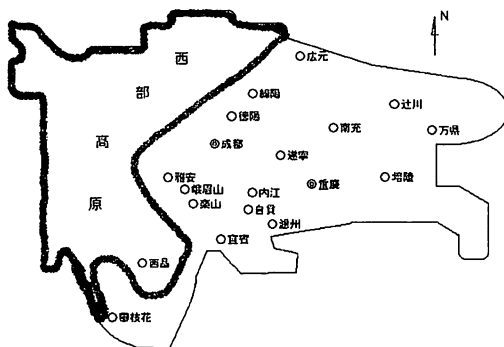


図2 四川省及び重慶市における酸性雨観測地点の概要

・酸性雨の傾向^{8)、9)}

1991～1995年における省内の全平均はpH4.69であり、総雨量の約55%がpH5.6以下の酸性雨であった。1996～2000年では酸性雨は総雨量の約41%に減ったものの、pH値の変化は緩やかである。1991～1995年の都市別の平均値では、南充市、綿陽市、宜賓市がpH4.5以下で最も低く、次いで峨眉山市、重慶市、瀘州市、樂山市あたりまでがpHが低い都市である。一方、徳陽市、西昌市ではpH5.6以上となっている。首都である成都市の平均pHは5.1であった。図3には成都市、綿陽市、樂山市における1991～2000年のpH値の変化を示した。成都市では最近の数年のpHが改善しているが、綿陽市と樂山市ではほぼ横ばいで推移している。図4に示すように四川省におけるpHは

冬（1月）、秋（10月）が低く、春（4月）～夏（7、8月）に高くなる季節的な傾向を持ち、1月を除いて1991～1995年の平均値に比べ1996～2000年の平均値は改善の傾向を示している。

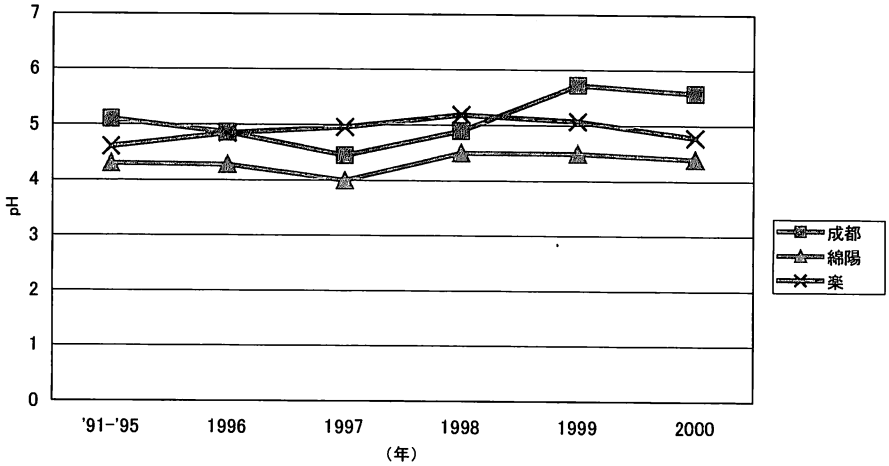


図3 主要都市における降水pHの経年変化

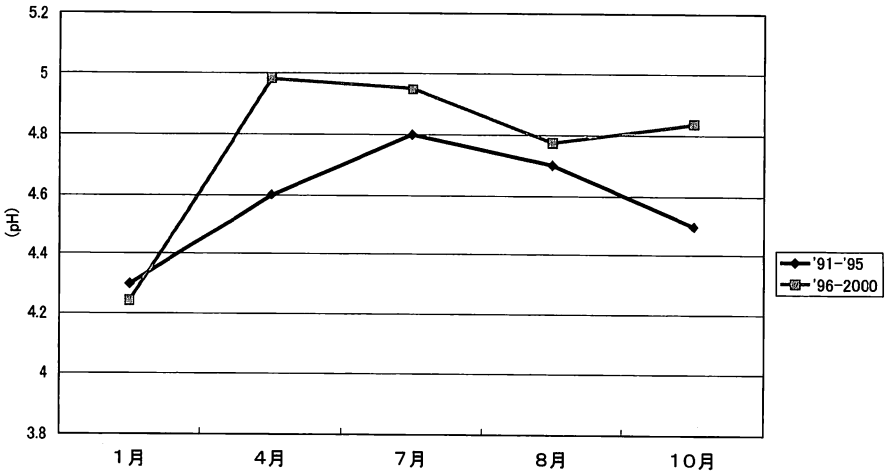


図4 四川省の降水pHの季節変化

・酸性雨の被害・影響

酸性雨の被害・影響は生態系及び文化財などにあらわれている。四川省では1980年代において、降雨の後に水稻や小麦の枯死が発生した例が報告されている他、松枯れの病害虫の遠因、あるいは峨眉山における冷杉（モミの1種）の枯損の原因として酸性雨の影響があげられている。また、重慶市では錆発生のために電線の交換時期が早まる等、省全体で年間約25万円の損害があるといわれている⁸⁾。

中国は材料試験の比較試験が行われることがなく、長い間材料試験の空白地帯といわれてきたが、1993年から中国、韓国、日本などで、酸性雨の文化財材料への影響調査が開始された。1年間の材料暴露試験の結果、炭素鋼、大理石、青銅などのいずれについても中国における腐食速度が速いことがわかった。特に重慶では日本の工業地帯に比べて炭素鋼の腐食速度は5倍以上であり、貴陽を除き中国の他の都市よりも数倍速かった¹¹⁾。また、樂山市の自然石でできた大仏の表面破壊が著しく、これが酸性雨によるものか、ガス状汚染物質によるものかはまだ意見の分かれるところであるが、酸化鉄を多く含んだ自然石の表面に硫酸鉄が生成しており、樂山市の硫黄酸化物の発生量が多いことから、硫黄酸化物による影響が重要と考えられている¹²⁾。



写真1 樂山大仏

(高さ約70m、自然石で造られた世界最大規模の大仏。大気汚染や酸性雨による表面の破壊が著しかった(写真左)が、2001年春に塗り直された(写真右)。)



写真2 枯損が懸念される峨眉山山頂付近の冷杉（モミの1種）

（峨眉山は四川盆地の西方に位置し、標高約400mの山麓から3000mを越える山頂までは亜熱帯、温帯及び亜寒帯気候帯が出現する。山頂付近には霧が発生することが多い。）

5. 酸性雨の成分比較

降水中には多種類の無機イオン成分や有機酸が溶け込んでおり、降水の酸性度などの性質を決定づける要因となっている。成分の定量を行うことによって発生源の対策に結びつけることができるなど、有効な情報が得られるが、中国の降水に関する成分データは現在のところ充分とはいえない。2001年1月から日本の環境省を中心に10カ国が参加して本格稼働を開始した「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク」のように、サンプリングから分析まで一貫して精度管理された成分データの充実が望まれる。ここでは、過去に試験的に行われた調査結果¹⁴⁾、¹⁵⁾と日本の第3次酸性雨対策調査の結果¹⁶⁾とを比較した。

表2及び表3に示したように、重慶市の降水成分の特徴は高い硫酸イオン濃度と低いpHであるが、それを中和するカルシウムイオンやアンモニウムイオン濃度の高さが降水の酸性化をある程度防いでいるといえる。

また、図5及び図6に示すように、日本の第3次酸性雨対策調査における全国の約50カ所の1993～1997年までの平均値と1997年の重慶市及び成都市の成分データを比較すると、四川省の降水では全体的なイオン成分濃度が日本に比べて

高いことや、前述の硫酸イオン、カルシウムイオン及びアンモニウムイオンが高い反面、日本では海洋起源で高くなっている塩化物イオン及びナトリウムイオン濃度が低いことがわかる。

表2 重慶市における降水成分の例¹³⁾

年	pH	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺
1986	4.35	15.4	1.43	0.87	0.32	0.48	2.63	0.31	2.89
1987	4.28	24.2	3.76	1.90	1.00	1.14	14.9	0.71	3.13
1988	4.21	24.4	3.94	1.16	0.60	0.92	5.50	0.39	4.94
1989	4.31	24.5	3.48	1.49	0.38	0.36	13.5	0.42	2.74
1990	4.29	23.2	2.29	2.07	0.57	0.49	5.96	0.44	3.61
1991	4.45	20.6	3.91	3.61	0.88	0.81	7.45	0.93	4.25
1992	4.43	21.2	3.68	1.41	0.67	1.02	6.64	0.77	3.54
1993	4.47	26.3	6.13	1.86	1.27	1.75	8.93	3.02	3.81
1994	4.70	20.8	4.36	1.55	0.70	1.07	7.59	0.81	3.95

(単位：mg/l)

表3 重慶市における降水成分の例 (1999年6～8月)¹⁴⁾

地点	pH	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺
郊外	3.86	7.7	1.6	0.20	0.07	0.30	1.2	0.05	1.1
都市域	4.33	11.1	1.8	0.53	0.19	0.46	3.4	0.22	2.0

(単位：mg/l)

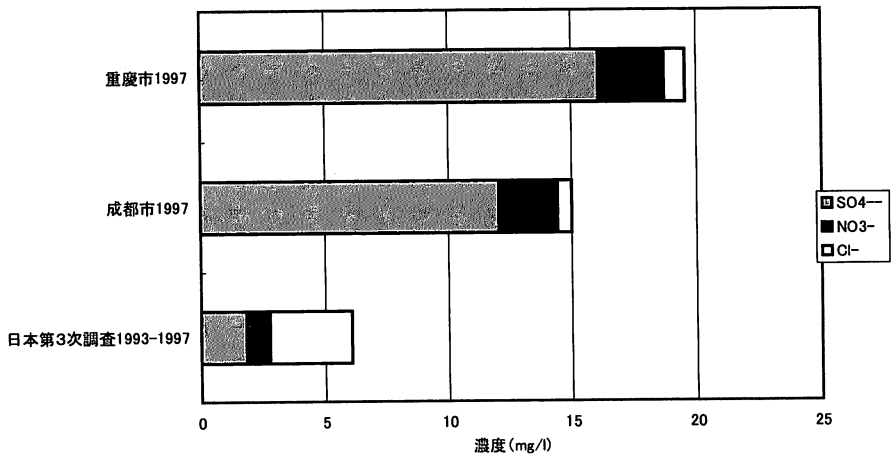


図5 陰イオン成分の比較

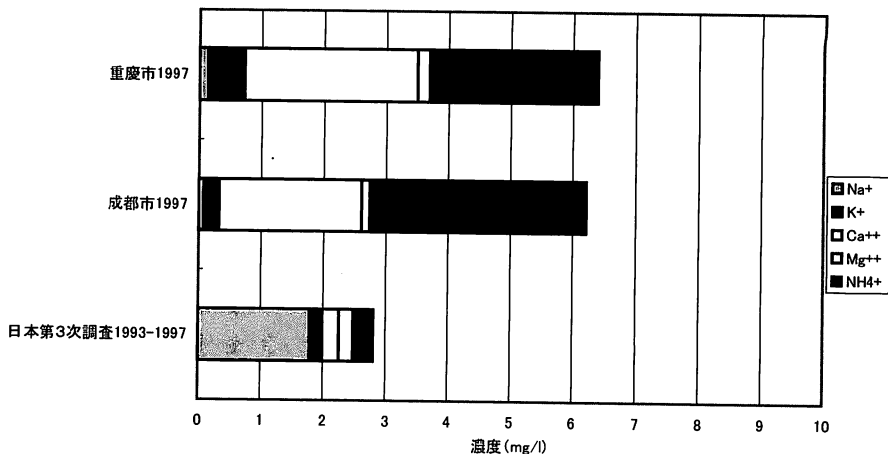


図6 陽イオン成分の比較

6. まとめ

欧米で1970年代に顕在化した酸性雨や大気汚染による被害は、国際的な取り組みなどの結果、概ね沈静化の方向に向かっているとされている。一方、急速な経済発展を遂げる東アジアの中心的存在である中国において酸性雨の最も激しい地域のひとつといわれる四川省の酸性雨の現状について概観した。

四川省では、1980～1990年代にかけて酸性雨や大気汚染によると見られる森林や構造物、文化財への被害が起こっている。この地域の酸性雨の特徴としては全体的に成分濃度が高く、なかでも高い濃度の硫黄酸化物が降水の酸性度を増しており、環境影響に重要な役割を果たしていると考えられる。このため中国政府では大気汚染や酸性雨の影響の著しい区域に関する二氧化硫黄の排出を規制するなどの対策をはじめており、一部にはその効果があらわれはじめていると考えられるデータも得られている。四川省では1991～1995年における省内の降水の全平均はpH4.69であり、総雨量の約55%がpH5.6以下の酸性雨であったが1996～2000年では酸性雨は総雨量の約41%に減ったものの、pH値の変化は緩やかである。対策は主に都市部において行われていることから、比較的広い範囲における現象である酸性雨について効果が明確にあらわれるには酸性物質の排出総量が相当量減る必要があると考えられる。1991～1995年と1996～2000年のデータ

を季節別に比較すると、最も酸性度の高い冬季には改善が見られないが、その他の季節にはpH値の改善の傾向が見られる。四川省内の主要都市においても、この10年間の降水のpHは僅かに改善しているか横這いという状況である。

このように四川省の酸性雨の状況には明るい兆しは見られているものの、今後、種々の対策によって酸性化物質の排出削減を徹底するとともに、酸性雨の状況の継続的な観測を行っていくことが必要と考えられる。

(本研究は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「アジア地域の環境保全」の一環として行われたもので、研究を行うにあたりご指導ご鞭撻いただいた関係各位に感謝申し上げます。)

7. 引用文献

- 1) 市川陽一:(入門講座)酸性物質の長距離輸送、大気環境学会誌、33, A9-A18(1998).
- 2) Kvaeven, B. et al.: ICP Waters - An international programme for surface water monitoring, Water, Air, and Soil Pollution, 130, 775-780(2001).
- 3) Skjelkvale, B.L. et al.: Trends in surface water acidification in Europe and North America (1989-1998), Water, Air, and Soil Pollution, 130, 787-792(2001).
- 4) Streets, D. et al.: Trends in emissions of acidifying species in Asia, 1985-1997, Water, Air, and Soil Pollution, 130, 187-192(2001).
- 5) 中国環境状況公報1999、国家環境保護総局 (1999) .
- 6) Hao, J. et.al.: Plotting of acid rain and sulfur dioxide pollution control zones and integrated control planning in China, Water, Air, and Soil Pollution, 130, 259-264(2001).
- 7) 分県中国地図集、中国地図出版社 (2000).
- 8) 四川省酸性雨プロジェクト概要、四川省環境観測センター (1997).
- 9) 楊治敏氏 私信 (2001).
- 10) 中華人民共和国国家標準 "Sampling and analytical methods of the wet precipitation", GB13580.1 ~ 13580.13, 国家環境保護局 (1992).
- 11) 辻野喜夫:酸性雨の文化財への影響、大気環境学会誌、33, A94-A103(1998).
- 12) 前田泰昭、竹中規訓:地球規模での酸性雨の現状と材料劣化、Zairyo-to-Kankyo, 40, 619-626(1991).
- 13) Ren, R. and Fengjie, M.: A chemometrics analysis on precipitation chemistry data in China, Proceedings of 5th International Joint Seminar on Regional

Deposition Processes in the Atmosphere, 189-195, Seoul, Korea(1999).

- 14) 平成10年度環境庁委託東アジア酸性雨モニタリングネットワーク推進事業報告書、(社) 海外環境協力センター (1999).
- 15) 大歳恒彦: 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク試行稼働期間中のモニタリング活動、大気環境学会誌、(印刷中) (2002).
- 16) 第3次酸性雨対策調査データ集(大気系調査分冊)、環境庁・(財) 日本環境衛生センター酸性雨研究センター (1999).