

環日本海域の環境に関する最近の研究について

平井英二

(金沢大学名誉教授・北陸大学
ライブラリーセンター長)

1 まえがき

1800年代の産業革命以後、工業は急速に発展し、人類の生活に快適さをもたらした。そして、化石燃料等の消費は増大し続けている¹⁾。現代はこの化石燃料を基礎とした大量生産、大量消費、大量廃棄の文明は大きな転換にさしかかっている。

このため、1992年6月、リオデジャネロ市で地球サミット（国連環境開発会議）が開催され、世界の183か国の首脳が出席した。この会議では温室効果ガスの排出規制に関する「気候変動枠組条約（気候変動に関する国際連合枠組条約）」、海域および沿岸域の保護に関する「アジェンダ21」²⁾などの5つのテーマが採択された。

この会議を契機として「持続可能な開発」が世界共通の合言葉として認識された結果、世界各国ではあら新たな環境保全のための枠組みを進めている。わが国でも平成5年11月に「環境基本法」を制定し、さらに環境保全に関する施策を総合的に進めるために、平成6年12月に「環境基本計画」を策定している。この計画では21世紀半ばまで展望して、環境政策の長期的な目標として、

循環（環境への負担の少ない循環を基調とする社会システムの実現）

共生（自然と人間との共生の確保）

参加（公平な役割分担の下でのすべての主体の国際的取組の推進）

をあげ、実現される社会を作っていくこと目指している。すなわち、いままでの社会構造や生活スタイルを見直し、資源を節約し、廃棄物をできるだけ少なくする工夫と、資源の再使用などの環境にやさしい循環型社会を作る必要があると考えられる。

1 ポーダレスな環境問題

このように地球サミットが開催されることは、地球規模で国境を越えたポーダレスな環境問題を国境を越えて各国が協力しあって解決しなければならないことを意味している。

現在考えられている最も重要な環境問題は次のものがある。

成層圏のオゾン層の破壊

酸性雨・雪

地球温暖化

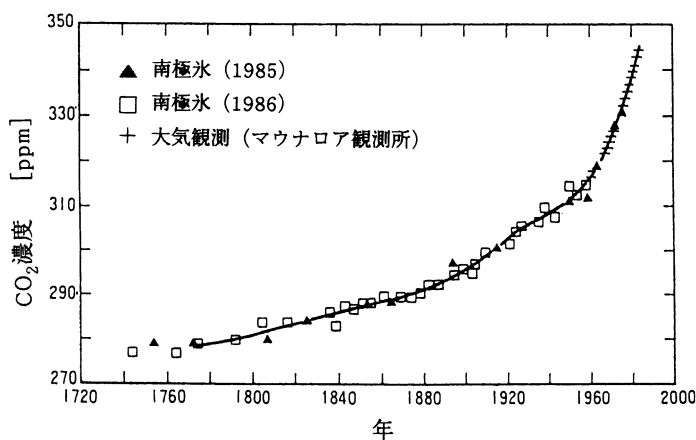
熱帯林の破壊、砂漠化

海洋汚染

これらは独立した現象でなく、関連があり、現象を引き起こす物質も共通しているものもある。例えば二酸化硫黄は酸性雨・雪と地球温暖化や森林の破壊にも関係している。いずれも地球規模のものである。

2 産業革命と大気汚染

第1図に示すように、大気中の二酸化炭素は次第に増加している。産業革命以前の段階では約275ppmであったといわれている。



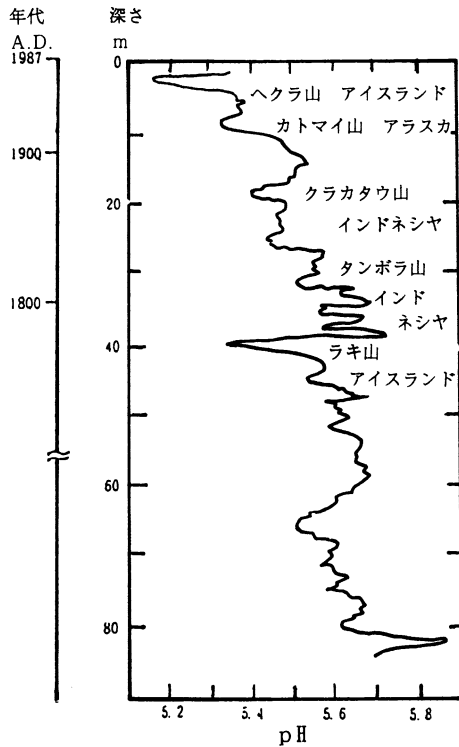
第1図 大気中の二酸化炭素濃度の経年変化 (ベルン大学)

大気中の二酸化炭素は降水に溶解し、重炭酸イオンと炭酸イオンの2段階に解離する。そして降水の電気的中性の関係を利用し、大気中の二酸化炭素の濃度と温度を仮定すれば、水素イオン濃度を計算することができる。二酸化炭素の濃度を330ppmとすれば、二酸化炭素以外を含まない降水は $\text{pH}=5.65$ (25°C)となり、弱酸性となる。660ppmでは $\text{pH}=5.5$ となる。酸性雨・雪からも二酸化炭素の増加は好ましい現象でない。

第2図³⁾は北極のスピッツベルゲル島(ノルウェー領でスカンジナビア半島の北方)で、氷のコアを深さ方向に採取し、融解させて pH などを測定したものである。1800年代までは火山活動によるシグナルはあるが、それを除くとほぼ一定であり、 pH は約5.6である。1800年代とはイギリスで産業革命が始まった年代である。

イギリスは鉄鉱石と石炭にめぐまれていたので、どの国よりも早く産業革命をなすとげ、製鉄、機械、造船、綿工業などが発達していった。植民地から原料を輸入し、これを加工して世界に輸出する「世界の工場」であった。

産業革命の特色の一つは新しい動力の発明である。このため、石炭の消費は増大し、人為的な硫黄酸化物や窒素酸化物が大気中に多くなり、これらの酸化物を含んだエアロゾルや雨や雪がスピッツベルゲル島でも集積し、時代と共に酸性が強くなってきたこと図は示している。なお、図



第2図 氷床コアのpHの変化

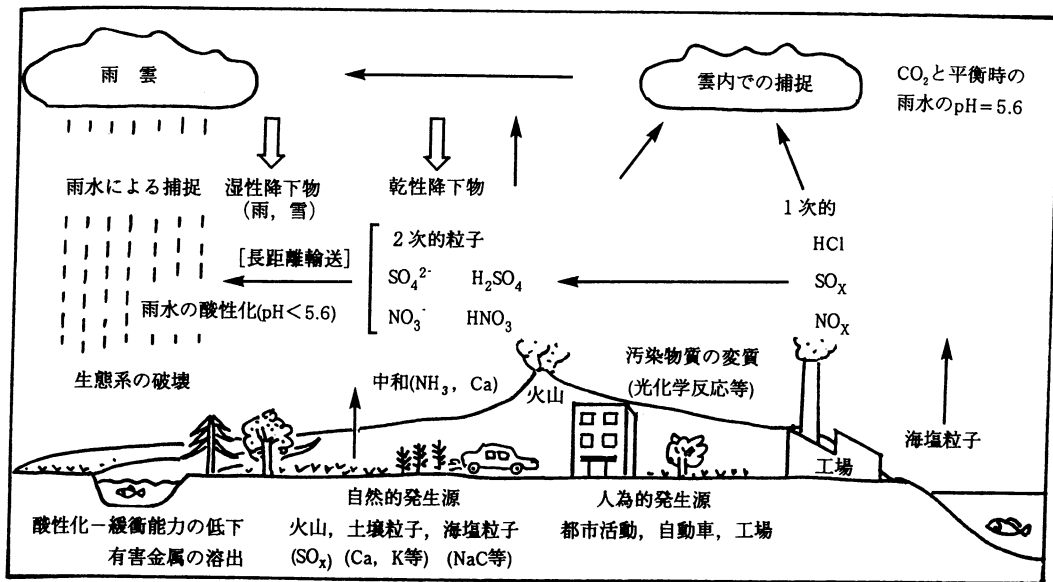
中の顕著なシグナルであるが、アイスランドのヘクラ山（1557m、爆発は1947年）、ラキ山（853 m、1783年）およびインドネシアのクラカタラ山（1883年）、タンボラ山（1815年）の火山活動と考えられている。とくに後者の2火山の活動による犠牲者はいずれも数万人にのぼっている。タンボラ山の活動の翌年の1816年は世界的に夏のない年として知られている。

3 硫黄および窒素酸化物の発生

第3図に示すように、大気中には、火山の噴煙などによる自然的発生源と石油や石炭などの化石燃料の燃焼などによる人為的発生源から放出された硫黄酸化物や窒素酸化物は、雪や降雨に取り込まれて複雑な化学反応を繰り返す。そして最終的には硫酸イオン (SO_4^{2-}) や硝酸イオン (NO_3^-) などに変化し、強い酸性を示す降雨・雪、または乾いた粒子状物質となって降下する。

大気汚染物質が降雨に取り込まれて酸性化する現象を発見したのは、イギリスの科学者 R.A.Smith⁴⁾ であり、1872年に出した著書に酸性雨 (Acid Rain) という言葉を初めて使用した。1961年にアメリカの E.Gorham が工業地帯に降る酸性化した雨の原因は、化石燃料によるものであり、主成分は硫酸であることを示した。このように北米のアメリカとカナダ間で酸性雨の被害も深刻化してきた。

世界のおもな酸性雨地域は上記の2地域以外には、中国・韓国・日本を含む東アジア地域があ



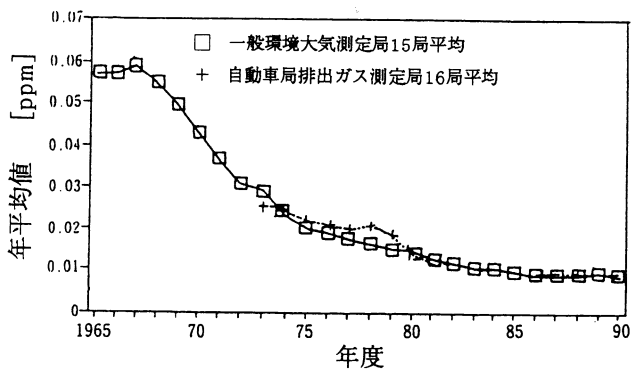
第3図 酸性雨現象のメカニズム

る。東アジアは上記2地域と異なって、黄砂現象があるため、これを考慮しなければならない。

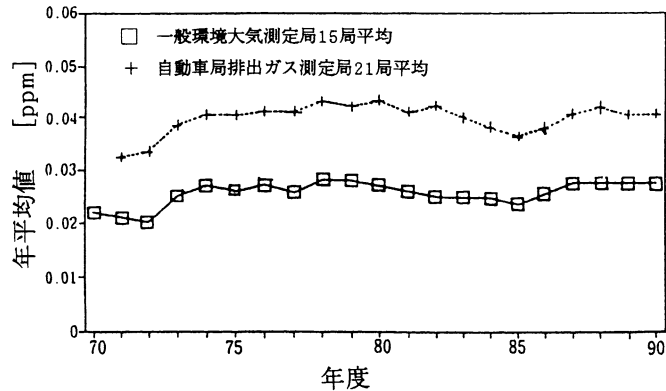
硫黄酸化物は人為的発生源と自然的発生源に大別される。前者はボイラー、燃焼炉などの固定発生源によるものが大部分であり、自然的発生源としては火山による噴煙がある。鹿児島県の桜島から放出される硫黄酸化物の量は日本全国の人為的発生源の量にほぼ匹敵すると言われている。

硫黄酸化物として代表される二酸化硫黄の大気中の濃度の経年変化（日本）を第4図に示す。排煙脱硫、省エネルギー、燃料構成の変化などによって、昭和42年度頃の最大値と比較するに、約20年後の現在は1/5程度であり、良くなっている。

しかしながら、二酸化窒素の濃度の経年変化（日本）は第5図のように20年間ほぼ横ばいである。これは自動車の排ガスが相当影響している。東京都全域の固定発生源と移動発生源（自動車など）の比率は、前者が約30%、後者が約70%であり、大都市ほど移動発生源の比率が高い。



第4図 二酸化硫黄濃度年平均値の経年変化（環境庁）



第5図 二酸化窒素濃度年平均値の経年変化（環境庁）

II 環日本海域の降雨・雪

1 日本海側の酸性雨

金沢市を含めた日本海側は先進国中でも有名な豪雪地方である。同市から南へ約50kmのところにある白山⁵⁾は、いまなお広く残されているブナ原生林があり、そこに生息する動物の種類が豊富なことはよく知られている。そして白山の寒冷な気候のため、高山植物が多く、高山帯の面積が狭いわりには種類も多い。もう一つ重要なことは北東-南西方向に細長い日本列島において、白山は高山帯を有する山として最も西に位置している。このように雪を媒体とした大気汚染物質の測定に良い条件にめぐまれている。

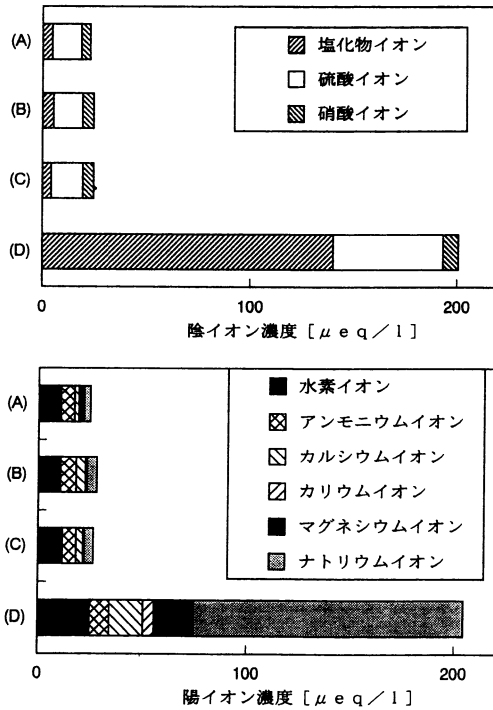
降雨が起こる気象条件として

- (A) 移動性前線型
- (B) 停滞前線型
- (C) 大気不安型
- (D) 西高東低型（冬型の気圧配置による降水）

の4つのパターンに分類し、石川県保健環境センターのデータを使用し、1984~1987年までの降雨について、1mm降雨毎に、降雨開始から5mm降雨まで採取したものを使用した。各気象条件(A)、(B)、(C)、(D)ごとの収束点における各無機イオン濃度の値を第6図に示した⁶⁾。各気象条件では、上に陽イオン成分の積層棒グラフを、下に陰イオン成分を示した。

西高東低型以外の気象条件では総陽イオン、あるいは総陰イオン濃度が約 $30\mu\text{eq}/\text{l}^{\text{註1}}$ であるに対して、西高東低型では約 $200\mu\text{eq}/\text{l}$ と非常に高い値を示している。西高東低型では日本海上を渡ってくる強い季節風による影響として、海塩由来の成分が高濃度含まれている。この影響を差し引いた水素イオンの濃度は他の気象条件の約2倍となっている。また硫酸イオン濃度に関しては、海塩由来量を差し引いた値(nss-SO_4^{2-} ^{註2})も西高東低型では他の気象条件に比して高い。

山口（島根県衛生公害研究所）も同様な結果をえている。日本海側の酸性雨（石川県と島根県）



第6図 各気象条件における無機イオン濃度

の特色として下記の通りである。

(1) 降水量は、太平洋側より日本海側が多く、特に冬期にこの傾向が著しい。

(2) 冬期降水中の SO_4^{2-} 、 NO_3^- の濃度が大きく上昇するが、 NH_4^+ 、 nss-Ca^{2+} の濃度も増加するため、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- の濃度増加の割には pH の低下は小さい。

(3) 北陸地方の SO_4^{2-} の年間降水量は国内で最も多い。冬期 SO_4^{2-} の濃度が高く、降水量が多いためである。

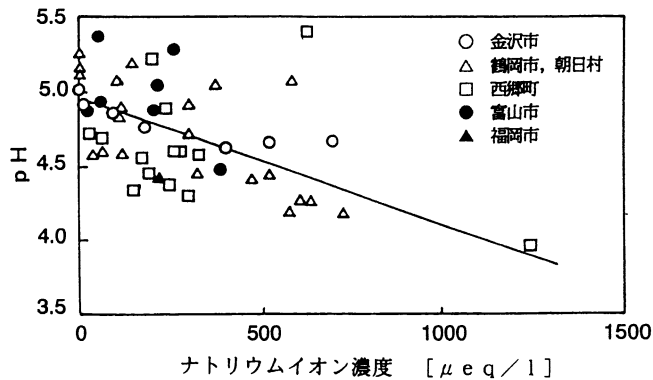
このことは、降雨中の大気汚染物質が、西高東低型の場合に日本海をへだてて、大陸方面からくることを予想したものである⁶⁾。この解析は本研究班の研究(1987年)が最初であり、大きな意味をもっている。

その後、北村⁷⁾は硫黄化合物に含まれる硫黄元素はそれぞれの供給源により、特有の硫黄安定同位体比 ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) を持っている。石炭、石油に含まれる硫黄、海水中の硫酸イオンの硫黄安定同位体比には、明らかに差がある。このことから、降水中の硫酸イオン硫黄安定同位体比を調べることは、その起源を知ることができることに着目した。質量分析装置を使用し、石川県の降水中の硫酸イオン硫黄安定同位体比を測定した。この結果、金沢では揚子江以北の中国北部の石炭燃焼による影響を受けている可能性が強いことが明らかになった。

2 日本海側の雪⁶⁾

東アジアから放出された大気汚染物質が、どの程度わが国に、特に日本海側に到達しているかの解析は日本海側での観測が不可欠である。とくに冬の典型的な西高東低型の気圧配置によって、日本海上空で水分を吸収した季節風が日本の中央山岳地帯に押し上げられる際に雪をもたらすことから、この風向をも考慮した観測点を設けて地域差などについても検討した。

季節風の強度を降雪中の海塩成分で評価することを試みた。ここで海塩粒子の代表的成分として Na^+ を選んだ。このような Na^+ 濃度とpHの関係を第7図に示した。観測点の海岸からの距離によって Na^+ 濃度に違いがあることや、種々の気象的要因にも影響を受けている結果と思われる。統計的処理をしたところ、いずれの観測点においても Na^+ 濃度が高まるにつれてpHが低下する傾向がみられた。十分とは言えないが、冬型の気圧配置のもとでの大陸方向からの大気汚染物質の寄与を示している。



第7図 Na^+ 濃度と降雪pHの関係

積雪は平野部では気温が比較的高いため、雪は暖かい日には上層部が融けて、融けた水は上層から地表の方へ流れていく。山間部に積もった雪は所々に氷層ができ、上層部で融けた水は、その氷層でせきとめられる現象が起こる。この氷層によって幾度もその流れが遮られ、積雪中の大気汚染物質は少しずつ濃縮され、春になって地表に達したときは、かなり濃縮された状態となる。

白山山岳部では3月下旬になってはじめて融雪しはじめ、ライシメーターに融雪水が貯留しはじめた。そして1~2cm厚さの氷層ができており、その氷層によって融雪水の流下が妨げられ、氷層近くの化学成分濃度が高くなる現象を確認することができた。また春先の河川水のpHにも影響を与えることが明らかとなった。

大気中の汚染物質が落下中の降雪や雨滴に取り込まれる量は、粒子や雨滴の形状と落下速度に関係している。非接触式で、実際の降雪粒子や雨滴の形状と落下速度の同時観測法を村本^{8, 9)}が確立し、南極の日本基地でも活躍した。テレビカメラを使用して、撮影した映像を画像処理し

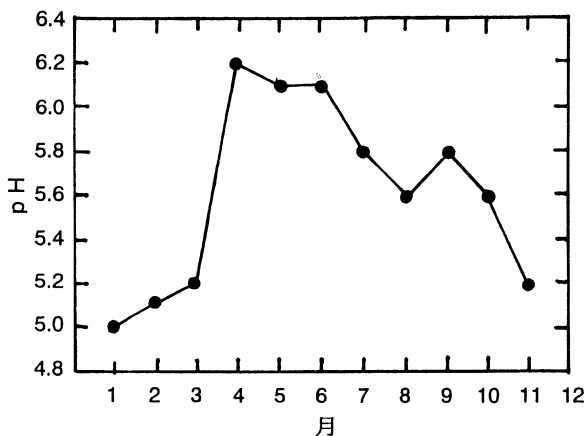
て、形状および落下速度を解析するシステムを開発し、実際に空中を落下の粒子や雨滴を測定した。このシステムを応用すれば、大気汚染の影響を早く知ることが可能と思われる。

3 中国および韓国の酸性雨

全 浩¹⁰⁾によると、降水の酸性化が進んでいる地域は泰嶺山脈の南側であり、SO_xの排出量の多い地域は泰嶺山脈以北の東北、華北および西北地域である。第1表に示すように、北京や天津では東京や大阪と比較して数倍高いが、降水の酸性化はみられない。重慶や貴陽と比較するに、SO₄²⁻の濃度はほぼ同じであるが、NH₄⁺、Ca₂₊濃度が高い。これが北京や天津の降水に影響していると考えられる。とくにCa₂₊は黄砂に多く含まれているので、黄砂によって降水が中和されているとも考えられる。第8図に示すように李敏熙による分析結果¹¹⁾から、ソウルでも春先の降水は中和されているのと同じ現象と思われる。

第1表 中国各都市の無機イオン濃度 (μeq/l)

都市名	北京		天津	重慶		貴陽	
	都市部	農村部	都市部	都市部	農村部	都市部	農村部
年	1981	1981	1981	1986~1991	1986~1991	1982	1982
pH	6.8	-	6.26	4.11	4.33	4.02	4.73
H ⁺	0.16	-	0.55	77.0	47.0	94.9	18.6
SO ₄ ²⁻	273	131	318	381	208	34.5	83.3
NO ₃ ⁻	50.2	16.0	29.2	25.2	21.1	9.5	15.6
Cl ⁻	157	179	18.3	29.8	21.1	8.9	5.1
F ⁻	-	-	-	34.7	33.2	-	-
NH ₄ ⁺	141	76.1	126	144	120	63.8	26.1
Ca ²⁺	184	125	287	198	90	149	45.0
Na ⁺	141	118	175	17.0	21.7	9.8	8.2
K ⁺	40.2	24.6	59.2	17.4	16.7	9.5	4.9
Mg ²⁺	-	-	-	30.8	15.0	43.4	13.3



第8図 ソウルにおける降水のpHの経月変化

重慶市について紹介する。同市のある四川盆地は起伏が多い丘陵地形であり、土壌が肥沃で、雨量も1000mm程度で相当に多く、中国で重要な亜熱帯作物も多くとれて、天然の倉という意味の「天賦の国」ともいわれている。そして重慶市はこの四川盆地の東南部に位置し、揚子江と嘉陵江の合流点に位置する中国西南部最大の工業地帯である。約1400万人の人口を擁する中国八大都市の一つである。

重慶市はこのように温暖で湿潤な亜熱帯気候であり、北側に高い山があって北からの冷たい空気が入りにくくなっている。風が弱く、平均風速は毎秒1.1mであるので、冬期に逆転層の出現頻度が高くなる。両河川のため濃霧の発生も多く、年平均で70日程度であるので「霧の都」とも呼ばれている。この霧水も相当汚染している。重慶地方における酸性雨・霧は経済や人の健康および生物環境に大きな影響を与えている。計算によると、森林と農作物の被害、建築材料の腐食、人の呼吸器の病気の増加などが発生している。毎年の経済的損失は5億元に達しているとみられている。

つぎに重慶市当局の発表によると、中央政府と重慶市は大気汚染と酸性雨問題に対しプロジェクト研究を行っている。各工業炉の改造やガス世帯の増加（都市区域のガスの普及率は70%以上）、華能路黄発電所には排煙脱硫装置が稼働している。

酸性雨・雪および霧をなくするには、原因となる硫黄酸化物および窒素酸化物の大気放出を抑制することが基本的解決法であろう。日本の排煙脱硫、脱硝技術はトップクラスであるので、その技術を提供し東アジアの大気汚染防止に役立てる。またこれには、さらなる国際的協力が必要である。

4 モルジブの水没の危機

平成6年の夏は酷暑に見舞われた。日本や韓国及び欧州も同様であり、温暖化現象でないかと言ふ意見もある。

同年3月末に、「第3回地球温暖化アジア太平洋地域セミナー」が大坂市内で開催された。その発表中にモルジブ（スリランカの南西、約640kmのインド洋上、国土は1800に及ぶ低いサンゴ礁島からなる国、面積は289km²、人口は約14万人）の代表から下記の報告があった。

国土は最高地点は標高3m程度であり、1m以下の地域が80%を占めている。温暖化が進めば、海面の上昇による国土の水没、地下水の塩水化、サンゴ礁への生態系の影響、漁業や観光等への深刻な影響が予想される。

Ⅲ 国際協力の一例

環日本海域の酸性雨・雪の研究の一環としては、中国のタクラマカン砂漠等から発生する黄砂現象がある。ヨーロッパやアメリカ、カナダの地域の酸性雨にはこの現象は発生していない。この黄砂現象は紀元前1150年の歴史書に記載されているほど古代からよく知られている。環日本海域独自の現象について3国（日・韓・中）でメスを入れ、平井研究班の韓国のスタッフ李敏熙と

全 浩が重点的に研究し、その他の国のスタッフが国際的に研究協力した。

上記のように、本研究班は環日本海域における酸性雨・雪について、活発に研究を行っていると同時に、シンポジウムや学会発表を日本、韓国、中国で行っている。さらに北京、ソウル、金沢等で年間に3回程度、本研究班のみの研究等について意見の交換をおこなっていた。

1991年12月18日に、中国の国務院環境保護委員会が開催され、酸性雨汚染抑制対策として、4項目が提出されたという、人民日報（海外版1991年12月19日）の記事があった。国務院李鵬総理は広西省や四川盆地（重慶市も含む）および貴州で広く酸性雨が発生した事実を極めて重視し、有効な対策を講ずるよう指示した。

4項目とは

- (A) 全国酸性雨監視網の設置
- (B) 酸性雨の科学技術的難所の解決
- (C) 酸性雨抑制の指導
- (D) 亜硫酸ガス排出費の徴収し、資金調達する

である。

1 中日大気汚染防止対策シンポジウム—重慶'92

主催は重慶市環境保護局と文部省科学研究費国際学術研究平井班である。人民日報の記事より前の6月に、丁子哲治富山工業高等専門学校教授、全浩（中国国家環境保護局中日友好環境保護中心総工師）と平井の3名が、酸性雨の影響が大きいといわれる重慶市へ行き、同市の環境科学研究所において、お互いに研究発表と意見の交換を行った。同時に南山公園や重慶大橋等の現場見学と調査を行った。シンポジウム名は「中日大気汚染防治対策研討会—重慶'92」（中日大気汚染防止対策シンポジウム—重慶'92）とし、主催は重慶市環境保護局と文部省科学研究費国際学術研究平井班であり、共催は石川県環境部、（社）国際善隣協会、中国科学技術協会未来研究会、中日友好環境保護中心であり、協賛は日本環境アセスメント協会である。準備に1年かかり、1992年10月27日～29日の3日間、重慶市ホリデイ・インで開催された。特別講演4件、日本および韓国側26件、中国側28件で、合計58件の多きにわたっている。とくに中国側の発表は重慶および中国での大気汚染の現状等が多くあり、非常に参考になる発表であった。中国、日本、韓国の研究スタッフが集合し、酸性雨を中心に検討を加えた初めての国際シンポジウムでもある。かつ、1992年8月に韓国と中国の国交が樹立したため、李敏熙、金熙江（建国大学校教授）の2名も参加していた。このため重慶市のマスコミの大きな関心を集めた。

2 著書「STRATEGY FOR AIR POLLUTION CONTROL IN EAST ASIA」

前述のシンポジウムの発表は大気汚染のデータも含むが、大気汚染についての基礎的な事項や酸性雨の各国の現状、土壌の中和反応機構及び酸性雨の分析、環境行政、火力発電所の排ガスや環境保全などの多方面にわたっている。

これらの発表論文に最近のデータを追加して翻訳し、1冊の書に纏めて刊行し、今後工業化される東アジアの諸国の大気汚染対策に役立てれば、かけがえのない地球のボーダレスな環境の解決の1つとなると考えた。これが1994年度の科学研究補助金研究成果公開促進費に採択され、さらに活用されやすくするための分野も追加し16章からなっている。以上がこの書の成り立ちであり、今秋に刊行の予定であり、東アジアの諸国に送付したい。

IV 結 び

結びの言葉として

人 类 只 有 一 个 地 球

重慶七中 張 文普

重慶でのシンポジウムの行事の1つとして、重慶の小中学生に環境に関する作文を募集した。重慶市の周 百興環境局副局長が選考結果を述べ、唐 情林副市長から賞状が手渡された。その作文中の題目の1つである¹²⁾。

注1： $\mu\text{eq/l}$ ：溶液1 l中の酸または塩基の当量で、 10^{-6} 当量基準

注2： nss-x ：降水中の成分Xの海塩由来以外の成分の濃度

引用文献

- 1) メドゥズ等編 大来監訳：『成長の限界—ローマ・クラブ「人間の危機」レポート』、ダイヤモンド社 (1987)
- 2) 地球環境法研究会編：『地球環境条約集 第2編』、中央法規 (1995)
- 3) Y.Fujii et al: "6000-Year Climate Records in an Ice Core from the Hoggsetta Ice Dome in Northern Spitsbergen", *Annals of Glaciology*, 14, 85 (1990)
- 4) R.A.Smith, *Air and Rain-The Beginnings of a Chemical Climatology.*, London Longmans & Green, (1872)
- 5) 石川県白山自然保護センター編：『白山の高山帯 (白山の自然誌6)』、 (1986)
- 6) 平井・丁子：「環日本海域 (日本、韓国および中国) における降雨・雪中の大気汚染物質の測定と解析」、『学術月報』、47、454 (1994)
- 7) 北村・他3名：「硫黄安定同位体比からみた石川県の降水中硫酸イオンの起源の推定」、『地球化学』、27、109 (1991)
- 8) 村本・他2名：「降雪粒子の粒径分布と落下速度のデータベース」、『電子情報通信学会誌』、J74-D-I、8、586 (1991)
- 9) 村本・他3名：「2台のカメラを使った降雪雪片の形状と落下速度の同時測定」、『電子情報通信学会誌』、J78-D-II、8、1249 (1995)

- 10) 全 浩：「中国における酸性雨の現状とこれからの課題」、『大気汚染学会誌』、26、283
(1991)
- 11) 李敏熙：「韓国における大気汚染の状況」、『国際学術研究研究成果報告集』、3、23 (1992)
- 12) 平井編：「重慶市小中学生の環境に関する作文」、『国際学術研究公開シンポジウム』、4、
83 (1993)