

## 特集：東アジア、西太平洋地域の環境問題

### 東アジア、西太平洋地域の酸性雨の現況

大喜多 敏 一

#### 1. 序 言

1991年にリオデジャネイロで開催された国連の開発と環境に関する会議で決定された「アジェンダ21」等に基づき、我が国の環境庁が東アジア酸性雨モニタリングネットワークの設立に乗出し、1993年10月26日～28日に富山市で第1回の専門家会議が開催された。本会議にはロシア、モンゴル、韓国、中国、日本、フィ

リピン、タイ、マレーシア、シンガポール、インドネシアの10カ国の専門家が参集した。会議の結果はコントリビューションを中心とした議事録に収録された。従って本文ではこの議事録を中心、他の情報も加えて総説したい。

以下に東アジア、東南アジア域を中心として、酸性雨の前駆物質である  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  の発生源分布、各国の酸性雨モニタリングの状況、モニタリングの結果、酸

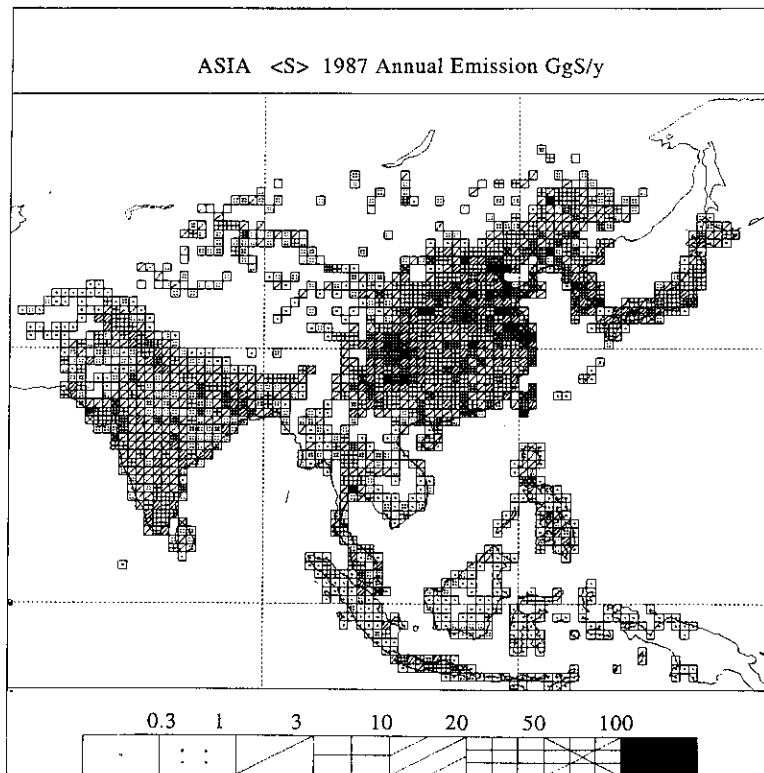


図1(a) 燃料燃焼及び工業活動に基づく  $\text{SO}_2$  発生量  
( $1^\circ \times 1^\circ$  の面積当り)

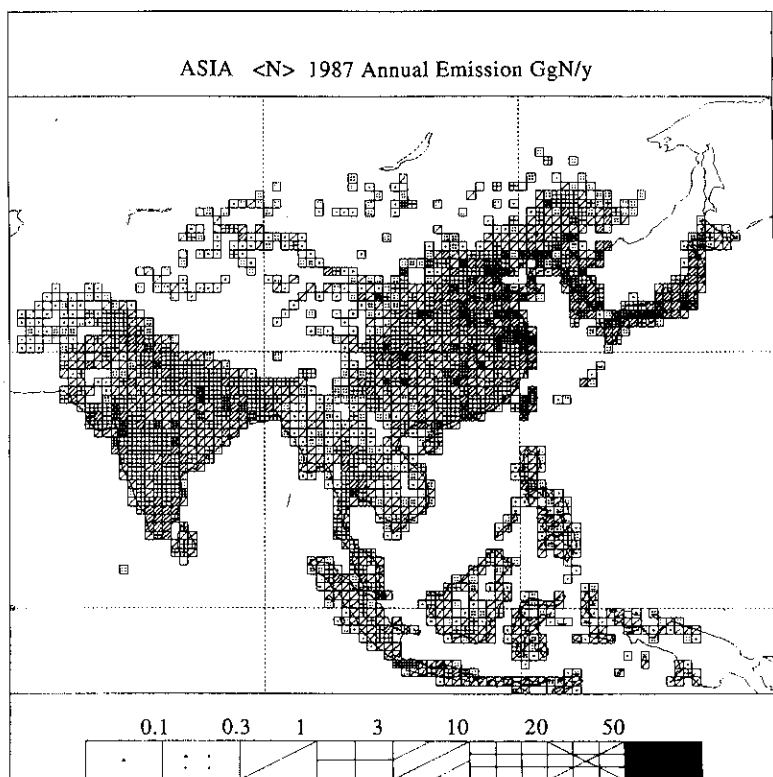


図1(b) 燃料燃焼及び工業活動に基づく  $\text{NO}_x$  発生量  
( $1^\circ \times 1^\circ$ の面積当り)

性物質や酸性沈着物の環境に及ぼす影響を中心に記載したい。但し我が国の事情には余りふれないことにした。

## 2. $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ の発生源分布<sup>2)</sup>

最近秋元ら(1994)は $60^\circ\text{E}-150^\circ\text{E}$ ,  $10^\circ\text{S}-55^\circ\text{N}$ の緯度、経度内における $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ の発生量をとりまとめている。調査年は1975, 1980, 1987年で、結果を緯度、経度につき $1^\circ \times 1^\circ$ の地域からの発生量に整理している(図1(a), (b))。

格子中では主要な火力発電所、製鉄所、化学・石油化学工場、精油所、空港、海港の位置を同定している。日本、韓国、北朝鮮、中国の海岸域、台湾を含む太平洋岸での $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ 発生量が大きく、年間のS, N発生量が各々100GgS, 50GgNを超える格子もある。 $\text{SO}_2/\text{NO}_x$ 発生量比よりみると、中国の四川・貴陽省等の特に $\text{SO}_2$ の発生量の多い地域がみられる。

## 3. 東アジア域各国における酸性雨モニタリング網

先に10カ国の名前をあげたが、これらの国々では何らかの形で酸性雨のモニタリングを行っており、中には国のモニタリング網以外に林業関係、電力会社、大学等のモニタリング網を持っている国もある。又年間を通じたモニタリングを行っている国が多いが、他方ある期間だけのモニタリングで済ませている国もある。

表1に富山会議の議事録より得たデータに1994年6月にマレーシアのクアラルンプールで開催された南・東・東南アジア酸性雨モニタリングネットワーク(ARNSESEA)会議で示されたデータを加え、前記10カ国で行われているモニタリングのための測定・分析法を比較した。比較は主として各国政府の行っている測定網に限定したが、それでも各国でなされている方法には大きなばらつきがある。

表1 各国での湿性沈着モニタリング法の比較

国	測定所数	降水サンプラー型	降水捕集頻度	化学分析
中国	189	(W.O.)	降水毎又は 1年間に4ヵ月	W.C., I.C.
インドネシア	(21)	(W.O.)	1週	W.C.
日本	42	W.D.	1週又は1日	I.C.
韓国	37	W.D.	?	W.C., I.C.
	19	手動型		
マレーシア	23	W.D.	1日	W.C.
モンゴリア	短期間	?	10日	W.C.
フィリピン	短期間	手動型	1日	W.C.
ロシア	121	(W.O.)	?	W.C.
	116	?		pH
シンガポール	13	手動型	1日	pH
		W.D.	1月	
タイ	短期間	手動型とW.O.	1日, 2週	I.C., W.C.

W.O. : Wet only, W.D. : Wet and dry, W.C. : 湿式法,  
I.C. : イオンクロマトグラフ ( ) 内 : ARNSESEA で示されたデータ

多くの国々で長期的なモニタリングがなされており、その数も国の大きさに応じて10乃至200近くとばらついているが、他方モンゴル、フィリピン、タイでは従来は短期間の測定しか行われていなかった。しかしタイ等では長期モニタリングの準備を進めている。

降水サンプラーとして、降水時手動で受水ロートの蓋をあける手動型サンプラーも尚多く用いられているが、降水に応じて自動的に蓋をあけしめ出来る Wet only 型や Wet and dry 型(降水のない時には蓋の位置が移動して、いわゆる乾性降下物のみを捕集する型)が次第にその数を増している。

1回の降水採水時間も数ヵ月より1日迄これも種々雑多である。分析もシンガポールのように pH だけを測定する国もあるが、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ の陽、陰イオンの分析には比色法等の湿式法を用いている国が多い。しかし徐々にではあるがイオンクロマトグラフが利用され始めている。

なぜ各国間に測定器、測定法等につき大差があるかの原因は、先づ経験のあるなし、従って十分訓練を受けた測定者が存在するかどうかであろう。しかし新しい測定器を購入する予算のないこと、特に測定器を維持するに必要な経費が得られぬ国が多いことも考慮せねばならない。

以上の状況下で東アジア地域における各国の酸性雨の測定値が相互比較できることを目指して、今回日本の環境庁が音頭をとってモニタリングネットワーク会

議が持たれた。

#### 4. 東アジア地域各国における酸性雨モニタリングの結果

東アジア域ではまだ欧米でみられるような国際的な酸性雨モニタリング網はないので、富山会議で示された各国のモニタリングの結果を次に示す。

##### (1) 中国

中国では1982年より第1回、1985年より第2回の各3ヵ年の国家モニタリング計画が行われた。更にその後モニタリングが継続されている。その結果中国の酸性雨域は主として揚子江の南側であって、そこではpH4.0-4.5の降水が四川省重慶市、貴州省貴陽市周辺でみられる(図2参照)。他方揚子江以北での降水pHは5.6以上である。北部の大都市周辺での $SO_2$ 濃度が高いのに拘らず、降水が酸性化していないのは、大気や降水中の $Ca^{2+}$ 、 $NH_4^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ の濃度が高いためである。

図3は1982年と1992年の降水のpH7.0、5.6の等値線を比較したもので、酸性化が少しづつでも進行していることが分る。

表2是北京、天津、重慶、貴陽における降水中の主要イオンの濃度である。酸性雨はいうまでもなく化石燃料の燃焼により生じるが、中国では石炭が70%以上を占めている。一般に $SO_2$ の発生量が $NO_x$ のそれよりかなり大きく、その結果貴陽では降水中の $SO_4^{2-}/$

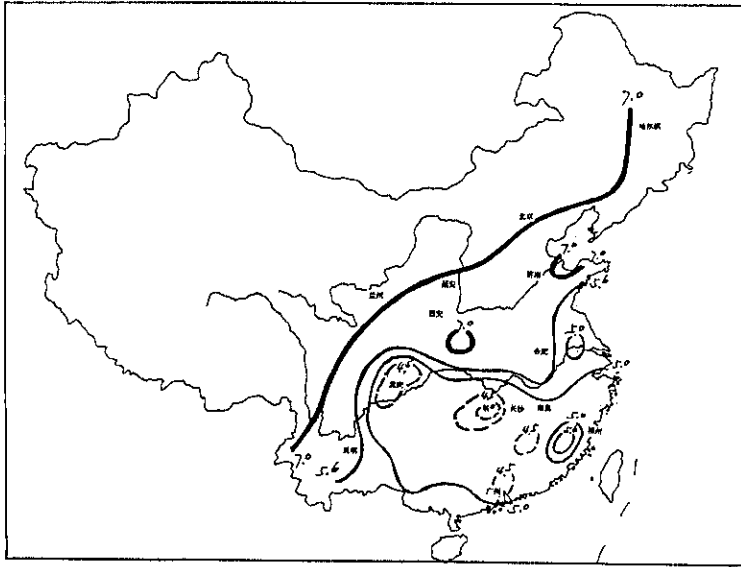


図2 中国における降水 pH 年平均値の分布

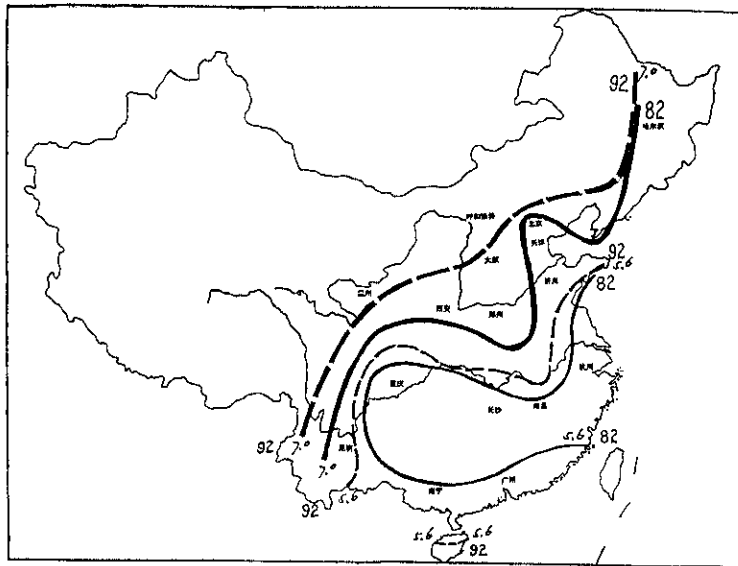


図3 中国における1982年と1992年の降水 pH の比較

$\text{NO}_3^-$ が10以上となる。

現在中国における石炭使用量は $1.1 \times 10^9$ トンを超えており、まだ上昇中である。又熱効率の悪い使用をしているので、今後脱硫装置、効率のよいボイラー、洗炭装置の設置やクリーンエネルギーの使用が望まれる。

## (2) インドネシア<sup>3)</sup>

インドネシアでは酸性雨の調査は気象・地球物理庁で行われている。表3はインドネシアの5市における降雨の年平均 pH である。表より短期間内では pH にはっきりした変化傾向はみられない。表4は1993年の5市における降雨中の成分濃度である。 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は

表2 中国の4市における降水中の主要イオン濃度

Cities	Beijing 北京		Tianjin 天津	Chongqing 重慶	Guiyang 貴陽	
	urban	rural	urban	urban	urban	rural
Year	1981	1981	1981	1982	1982	1982
pH	6.8	—	6.26	4.14	4.02	4.73
H <sup>+</sup>	0.16	—	0.55	73	94.9	18.6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	273.13	131.04	317.71	283.0	345	83.3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50.23	15.97	29.19	21.5	9.5	15.6
Cl <sup>-</sup>	157.43	178.86	183.14	15.3	8.9	5.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	141.11	76.11	125.56	81.4	63.8	26.1
Ca <sup>2+</sup>	184	124.5	287	100.6	149	45.0
Na <sup>+</sup>	140.87	117.83	175.22	17.1	9.8	8.2
K <sup>+</sup>	40.23	24.62	59.23	14.8	9.5	4.9
Mg <sup>2+</sup>	—	—	—	31.0	43.4	13.3
Σ (-)	480.9	325.9	530.0	327.0	376.4	103.0
Σ (+)	508.3	343.1	647.0	317.9	370.4	116.2

表3 インドネシアの5市における降雨の年平均 pH

年	ジャカルタ	ボゴール	メダン	パレンバン	メナド
1985	5.40	—	5.33	5.52	5.45
1986	5.63	—	5.39	5.40	5.44
1987	5.53	—	5.72	5.48	5.28
1988	5.81	5.60	5.60	5.60	5.28
1989	5.84	5.40	5.59	5.59	—
1990	5.57	5.45	5.61	5.62	—
1991	5.62	5.08	6.20	5.90	—

表5 韓国の5市における降雨の年平均 pH

年	ソウル	釜山	大邱	光州	大田
1986	5.3	5.2	5.4	6.1	5.4
1987	5.1	5.4	5.3	5.8	5.5
1988	5.7	5.2	5.6	5.7	5.7
1989	5.6	5.2	5.3	5.7	5.8
1990	5.0	5.2	5.7	5.5	5.4
1991	5.4	5.1	5.9	5.5	5.6
1992	5.3	5.4	5.6	5.7	5.7

表4 インドネシアの5市における1993年の降雨中の主要成分濃度と酸性度, アルカリ度

項目	ジャカルタ	ボゴール	メダン	パレンバン	メナド
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	0.63	0.30	0.28	0.42	0.30
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	1.39	0.43	0.33	0.39	0.43
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	0.40	0.28	0.28	0.37	0.28
酸性度	—	0.06	0.05	0.05	0.06
アルカリ度	0.07	—	—	—	—

ジャカルタで最高であるが、ジャカルタでは NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の方が SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度より高いのは自動車の影響だろうか。インドネシアでは今後石炭火力発電所の設置が予定されており、又汚染物の長距離輸送が問題となるので、今後モニタリングが重要となるだろう。

### (3) 韓国

韓国では環境處と農林省の測定網以外に気象研究所と延世大学の測定網が動いている。前者ではソウルとほぼ同緯度で韓国を東西に横断する線上の5地点で wet-only サンプラーで降水を採取し、pH, E.C., 主

要イオンを分析した。体積加重年平均 pH はソウルでの4.2より Inje の5.3であった。延世大学では現在うつ陵島、黄海上の孤島、南方の海岸、済州島などの清浄地でのモニタリングを開始した。

表5は1986-92年の韓国の5市における降水の年平均 pH であって、この7年間に大きな pH 変化があったと思われぬ。

### (4) マレーシア

マレーシアでは酸性雨モニタリングは気象局が担当しているが、図4にマレーシアの半島部における1985-92年間の pH 分布が示されている。1985年には5.2以下の pH の地域は Penang-Perai, Johore Baru-Senai, Klang Valley の3地域だけであった。1992年には全域に拡大した。半島部では北東モンスーン時には pH が増加し、南西モンスーン時には減少した。又クアラルンプールが最も酸性雨の影響を受けている。今後マレーシアを含めた熱帯域での大気化学の研究が望まれる。

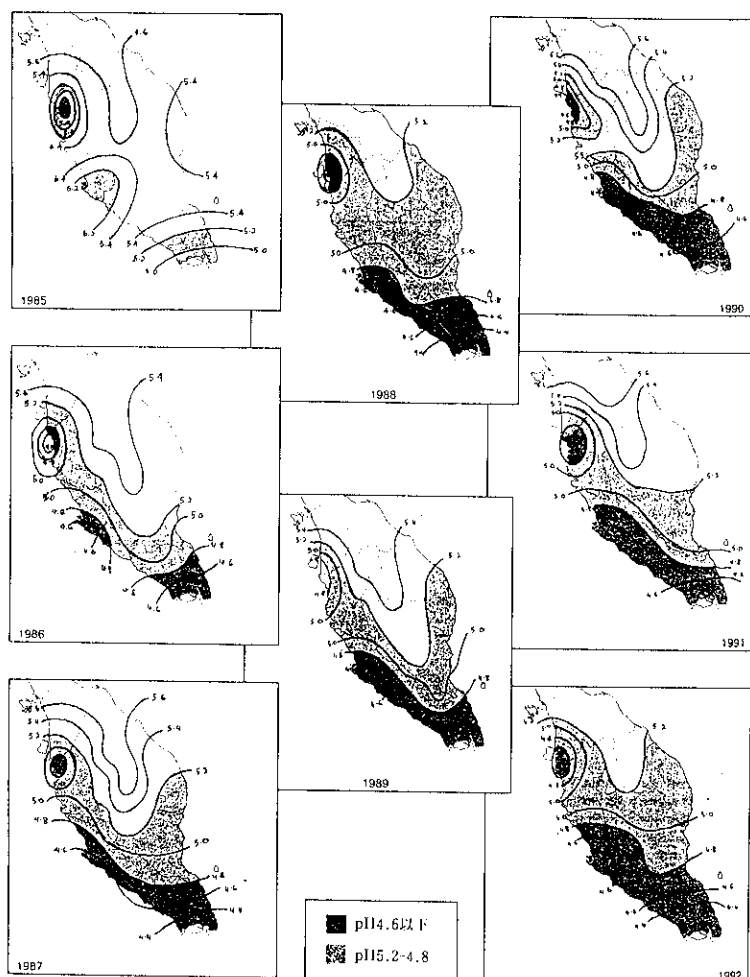


図4 マレーシア半島部における雨水 pH 分布 (1985-1992)

#### (5) モンゴル

モンゴルでは1989年より中央自然・環境研究所等でモニタリングが開始された。ウランバートル等の8局で測定がなされている。又ウランバートル域では50~60地点で雪のサンプリングも行われている。

表6には降水モニタリングの結果を示した。TereljiにはBAPMoNのバックグラウンド測定所が設置されている。冬季には大都市での汚染の増加により、降水中の成分の増加がみられる。

#### (6) フィリピン

フィリピンでは1986年に環境経営局(EMB)がマニラ及びその周辺の15点で始めて雨水のpH,  $\text{SO}_4$ 等を測

表6 モンゴルでの降水モニタリング結果

地 点	pH	$\text{SO}_4$ mgS/l	$\text{NO}_3$ mgN/l	$\text{NH}_4$ mgN/l
Vlaanbaatar	7.72	8.67	0.78	2.55
Darhan	7.44	8.44	0.62	1.35
Sukhbaatar	7.46	7.97	0.64	1.37
Murun	7.13	6.92	0.57	1.1
Terelji	6.7	1.52	0.48	1.25

定した。pHは3.7~7.7であった。1988年よりセントトマス山にBAPMoN測定所が設置され、年平均pHは6.02であった。

#### (7) シンガポール

シンガポールにおける降雨採水地点と、その中の数

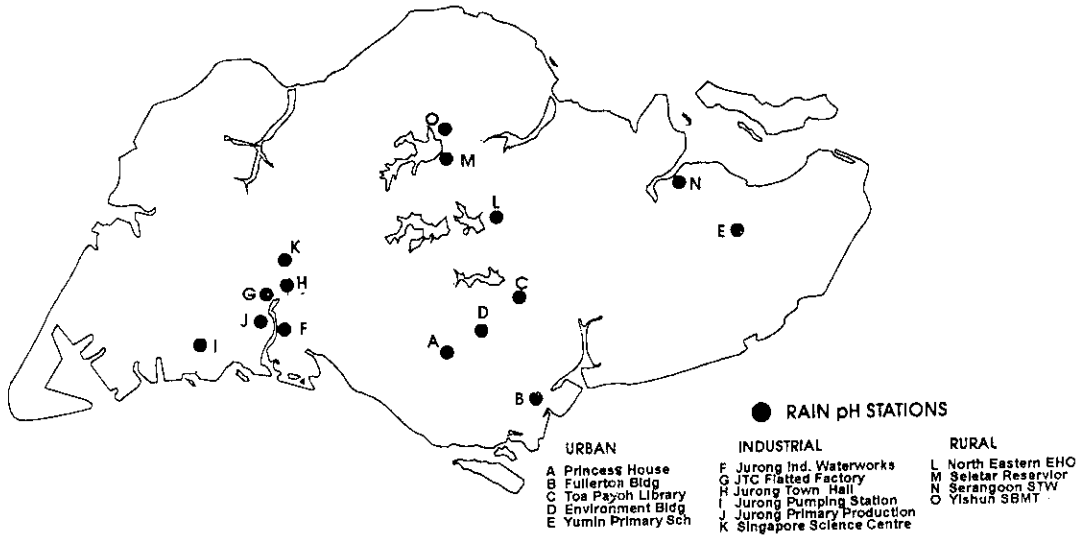


図5 シンガポールにおける降雨 pH の測定所

表7 シンガポールの各測定所における年平均 pH (1982-1992)

測定所	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Ave
都市域												
A	5.5	5.1	5.1	5.2	5.0	5.0	—	—	—	—	—	5.2
D	—	—	—	—	—	5.1	5.0	4.4	5.3	5.6	5.9	5.2
E	—	—	—	—	—	5.0	5.3	4.6	5.7	5.9	6.0	5.4
平均	5.5	5.1	5.1	5.2	5.0	5.0	5.2	4.5	5.5	5.8	6.0	5.3
工業地域												
G	5.3	5.3	5.4	5.4	—	—	—	—	—	—	—	5.4
F	—	—	—	—	5.0	5.0	4.9	4.3	4.9	4.8	—	4.8
H	—	—	—	—	—	5.2	5.3	4.3	4.9	4.7	5.2	4.9
平均	5.3	5.3	5.4	5.4	5.0	5.1	5.1	4.3	4.9	4.8	5.2	5.1
田園域												
M	—	5.8	5.6	5.5	5.4	—	—	—	—	—	—	5.6
平均	—	5.8	5.6	5.5	5.4	—	—	—	—	—	—	5.6

点の年平均 pH 値を各々図5及び表7に示した。pH は4.3~5.8の範囲にある。又都市、工業地、田園域の間に大差はない、季節変動では4月付近、9~10月のモンスーンの間期に pH が低下した。他方北東・南西モンスーン期には雨、風共に強くなるので、pH は高くなる。年平均 pH は都市、工業域では1975年より1980年にかけて低下したが、1980年以後は増加した。

(8) タイ

タイでは Ko Sichang 島にある BAPMoN 測定所 (平均 pH6.54) 以外に、幾つかの大学、更にストックホルム大学との共同により酸性雨の調査が、長期的で

表8 タイの4地点での降水・土壌水モニタリング結果

地点	雨 水			土壌水
	pH	酸性度 CaCO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	
チェンマイ	4.8-6.9	1.87-17.79	0-6.7	5.1-8.6
コンケン	5.4-7.5	2.35- 8.28	—	4.8-8.0
バンコク	4.5-7.2	1.85-30.25	—	6.2-8.4
ソクラ	4.5-6.9	1.12-13.36	—	5.7-8.5

はないが行われている。表8はその結果の1例である。特にタイ北部で硫黄含量の高い褐炭を利用した Mae Moh 発電所が稼働後、1992年10月に発電所から

のSO<sub>2</sub>により1000人以上が病院の外来で診察を受け、その中34人が入院した。この事件と更に発電所が現在の2025MWより2005年の5025MWへその容量を増加させる計画により、これによる酸性雨の影響、更に周

辺諸国からの酸性物質の長距離輸送の影響についての関心が高まっている。

(9) ロシア

ロシアは欧州にある国として欧州監視評価計画

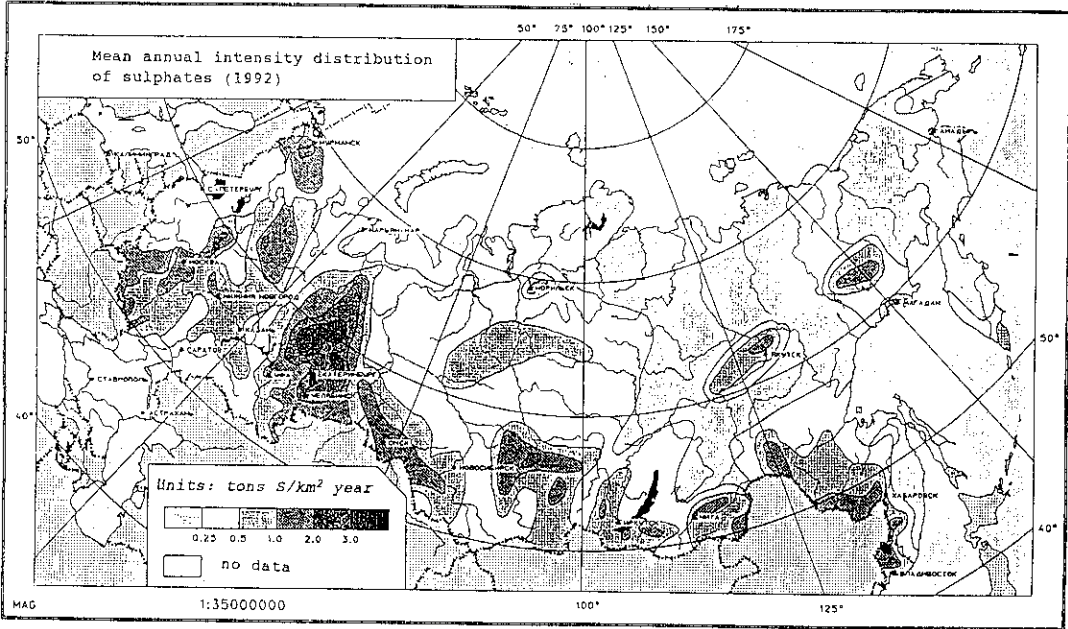


図6(a) ロシアにおける硫酸塩の年平均沈着量分布 (1992年)

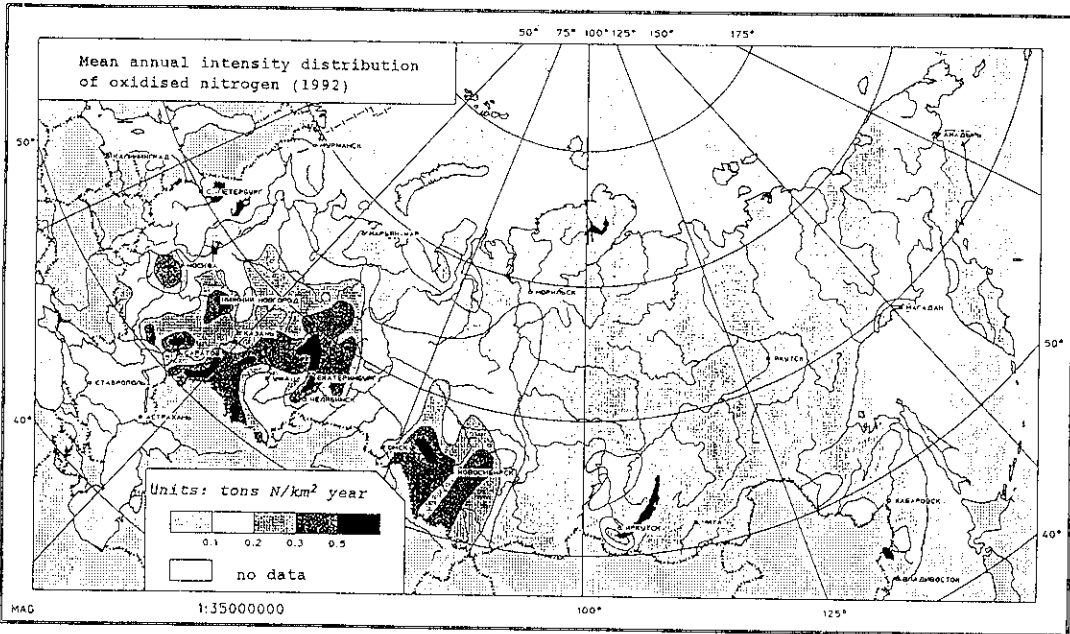


図6(b) ロシアにおける硫酸塩の年平均沈着量分布 (1992年)



(EMEP)の一員であると共に、シベリア域に観測所を展開している。しかし広域の状況を完全に把握するにはまだ時間がかかる。ここには欧州域、アジア域におけるS、N平均沈着フラックスの総沈着量(表9)とS、N沈着量分布(図6(a), (b))を示すにとどめる。

表9 ロシアにおけるS、Nの平均沈着フラックス(ton/km<sup>2</sup>)と総沈着量(×10<sup>6</sup>ton)

地域		SO <sub>4</sub> ・S	NO <sub>3</sub> ・N	NH <sub>4</sub> ・N
欧州域	フラックス	1.04	0.24	0.40
	総沈着量	6.70	1.50	2.17
アジア域	フラックス	0.45	0.09	0.24
	総沈着量	8.10	1.65	3.60

### 5. 韓国, 中国における酸性雨による生態系等への影響

富山会議において発表された酸性雨の生態系への影響について、我が国の外には韓国及び中国からの発表があった。但しこれらの結果には酸性雨だけでなく大気汚染等の影響も含まれていると思われる。

#### (1) 韓国

韓国の発表中でみられた結果の幾つかを以下に列記した。

##### ・年間のバイオマス生成量

Yeochonにおいて、非汚染域における針葉樹のバイオマス生成量は汚染域の2.1倍以上で、広葉樹では28%増であった。ウルサンでは、針葉樹につき0-60%増、広葉樹では27-76%減であった。

##### ・樹種の多様性と樹木活性

Yeochon工業地域において、一化学会社の付近を除き多様性に変化はみられなかった。ソウルとウルサンにおける日本赤松の活性は低かったが、モンゴルカシの活性には地域差はなかった。

##### ・植生構造

非汚染地域の樹林層中の樹種の数ソウルや工業地域のそれよりも多かった。

##### ・各因子間の相関

降雨の酸性度と樹木活性とは有意の相関はないが、葉中の水溶性硫黄、樹木活性、土壌pHの間には高い相関がみられた。

##### ・土壌

工業地域、都市域、郊外での土壌のpHは1986-92年の間にいずれも低下した。表土のAl濃度は対照区<郊外<工業地・都市の順に高い。ソウルとウルサンでは土壌の中和容量は汚染源から遠ざかると共に増加する。

#### (2) 中国

中国では酸性雨等による生態系等への被害について、特に四川省の重慶市とその周辺の南山、又峨嵋山における森林や文化財の被害が有名である。南山では約800haの馬尾松森がみるかげもなく枯死している。その原因を探るために日本の東京農工大学を中心とした研究者と中国科学院生態環境研究センターの研究者が合同研究班を組織し、1990-94年に共同研究を行った。その結果の詳細は文献1に示したが、研究班は重慶市南山地区を中心として1991年5月より、大気汚染・酸性雨の実態、陸域生態系(湖沼、森林、土壌)に与える影響、大気汚染・酸性雨の発生源対策について調査した。

大気中の硫黄酸化物と窒素酸化物を森林内外の2地点で2段フィルターを用いて捕集分析した。林外における年平均濃度はSO<sub>2</sub>220μg/m<sup>3</sup>(77ppb)、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>32μg/m<sup>3</sup>であった。この濃度のSO<sub>2</sub>は馬尾松に被害を与えるに十分である。季節変化(図7)を見ると、SO<sub>2</sub>濃度は11月から1月の冬季に高くなった。森林への硫黄酸化物の年間湿性沈着量は93.1kgS/ha、樹冠への乾性沈着量は46.6kgS/haであり、欧米、日本の森林での沈着に比べ極めて大きかった。

南山地区に成育する馬尾松林とクスノキ林では、酸性降下物による影響で植物生産量が著しく低い。また夏季から秋季において葉中に集積する硫黄・フッ素分の増加速度は、郊外の非汚染地域と比較して、南山地区の汚染地では2.3倍高かった。南山周辺では硫黄酸化物の他にフッ素化合物による影響も予想される。土壌溶液のpHは馬尾松林で4.3-4.6、クスノキ林で4.5-5.0であった。

重慶市での石炭燃焼由来のSO<sub>2</sub>発生量の内訳は発電所・大工場:29%、中小工場:33%、家庭:38%で、特に中小工場での大気汚染対策が遅れている。効率の悪い中小ボイラーが市内に24,000基あるため、燃料の改善として粉炭に石炭を混合して高圧成型した石炭プ

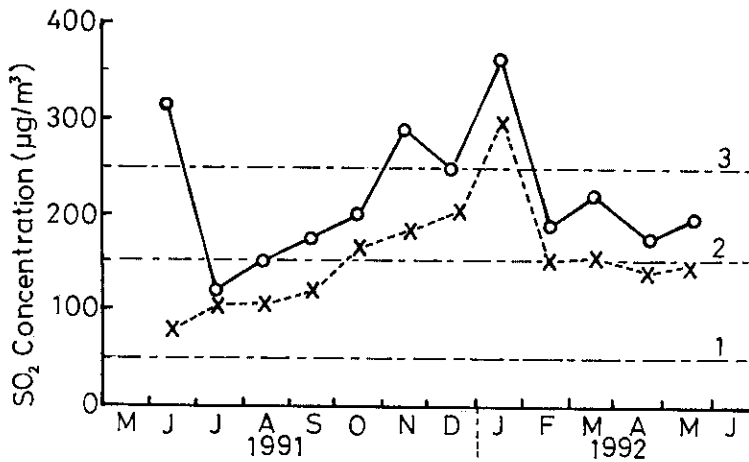


図7 南山における大気中のSO<sub>2</sub>濃度の月変化 (○林外, ×林内, 1, 2, 3は中国の環境基準で, 各々自然, 都市, 工場地帯の基準値である)

リケットが有効である。基礎的な脱硫実験では60-80%の脱硫率を得た。またコスト概算によれば、半乾式脱硫法や流動層が内脱硫法の30%程度ですむ。

又馬尾松林を酸性雨の被害より守るためには、大気中のSO<sub>2</sub>濃度を低下させるとともに、土壌表面にドロマイトなどを散布し、土壌の理化学性を改善することが望まれる。又馬尾松は大気汚染や酸性雨による土壌酸性化に感受性の高い植物であるため、汚染環境に抵抗力のある常緑広葉樹の林に変えていくことが望まれる。

なお1982年6月18日の夜、南重慶郡で14mmの雨が降り、その翌日稲が赤く焼けたようになった。被害のあった稲田の面積は667haであった。一般に重慶の郊外では大気汚染や酸性雨により野菜の生産量は30-50%減少する。

#### 引用文献

- 1) アジア太平洋地域を中心とする地球環境変動の研究・東アジアにおける人間活動に基づく生態系の劣化と修復班・酸性雨グループ (1994) 酸性雨の発生源対策と生態系保全-重慶における日中共同研究成果8p.p.
- 2) H. Akimoto and H. Narita (1994) Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia. *Atmos. Environ.*, 28, 213-226.
- 3) H. Harjanto and M. Naibaho (1994) Country report on acid rain measurement and monitoring in Indonesia to ARNSESEA. 9p.p.
- 4) Proceeding of the Expert Meeting on Acid Precipitation Monitoring Network in East Asia. October 26-28, 1993, Toyama, Japan Environment Agency, Government of Japan 331p.p.