

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR-7-'91

## 雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究

Study on Air Pollution Accompanied by Physical Process of  
Masses of Cloud Over Japanese Archipelago

昭和61年度～平成元年度

FY 1986～1989

**NIES**

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan  
国立環境研究所特別研究報告

# 雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究

Study on Air Pollution Accompanied by Physical Process of  
Masses of Cloud Over Japanese Archipelago

昭和61年度～平成元年度  
FY 1986～1989

環境庁 国立環境研究所  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

特別研究「雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究」

(期間 昭和61年度～平成元年度)

特別研究責任者：大喜多敏一 大気環境部 部長 (昭和61年度)

秋元 肇 同 上 (昭和62年度～平成元年度)

特別研究幹事：植田 洋匡・若松 伸司・村野健太郎

報告書編集担当：若松 伸司

## 序

昭和61年度から平成元年度にかけて4年間実施した特別研究「雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究」が終了した。本特別研究は、大気汚染物質の列島規模長距離輸送並びに輸送中に発現する都市型窒素酸化物汚染、光化学オキシダント汚染、二次粒子汚染、湿性大気汚染及び酸性雨など種々の形態の大気汚染について、その生成機構と動態を解明し予測方法を確立することにより、列島規模大気保全計画に資することを目的として行われたものである。

研究は(1)雲物理過程・混合反応過程と(2)複雑地形上の大気現象に関する基礎研究、(3)野外調査による列島規模の大気汚染・気象の動態把握、そして列島規模大気汚染予測手法としての(4)風洞予測手法と(5)数値予測手法の確立の5研究課題に沿って進められた。また研究対象には、(1)太平洋沿岸－関東平野－中部山岳地域－日本海沿岸を結ぶ陸上を渡る大気汚染の長距離輸送と、(2)九州－日本海－朝鮮半島を結ぶ海上を渡る大気汚染の長距離輸送を取り上げている。ここで扱った大気汚染はすべて従来型大気汚染と酸性雨を含んでおり、これらの大気汚染についての数値モデルは一応の完成をみた。そして、夏季については観測によりその妥当性を検証している。

今後必要と考えられる研究方向としては、冬季の都市規模、地域規模大気汚染と排出削減効果、並びに酸性、酸化性物質の生成とその環境に与えるインパクトがあげられる。前者については、平成2年度からの特別研究「都市域における冬季を中心とした高濃度大気汚染の予測と制御に関する研究」によって、また後者については地球環境研究総合推進費による研究「酸性雨」によって、それぞれ発展的な継承がなされている。

研究を推進する上で、研究所外の多くの方々にご協力とご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。

平成3年3月

国立環境研究所

所長 小泉 明

# 目 次

1 研究の目的と経緯 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 研究の目標と達成度 .....	1
2 研究の成果と概要 .....	3
2.1 陸上を渡る大気汚染の長距離輸送 .....	3
2.1.1 沿岸地域から内陸山岳地域への大気汚染長距離輸送機構 .....	3
2.1.2 大規模観測と数値モデル .....	7
2.1.3 夏季長距離輸送中に起こる種々の大気汚染 .....	12
2.1.4 冬季の都市型 NO <sub>2</sub> , 二次粒子汚染 .....	16
2.1.5 窒素系汚染物質, 硫黄系汚染物質の収支と乾性沈着量 .....	16
2.1.6 排出量の削減効果の検討 .....	17
2.1.7 スギの衰退と二次汚染物質 .....	18
2.2 海上を渡る大気汚染の長距離輸送 .....	18
2.2.1 成層圏 O <sub>3</sub> の地上への輸送現象 .....	18
2.2.2 火山からの SO <sub>2</sub> の長距離輸送 .....	21
2.2.3 海を渡る広域大気汚染 .....	24
2.2.4 長距離輸送中の SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> の生成 .....	25
2.2.5 九州全域におけるエアロゾルの観測 .....	29
2.2.6 上空並びに地上での雲水, 雨水の観測 .....	31
2.2.7 九州全域における雨の分析 .....	36
2.3 まとめと今後の研究課題 .....	37
[資料]	
I 研究の組織と研究課題の構成 .....	41
1 研究の組織 .....	41
2 研究課題と担当者 .....	43

Ⅱ 研究成果発表一覧 .....	44
1 誌上发表 .....	44
2 口頭発表 .....	51

# 1 研究の目的と経緯

## 1.1 はじめに

大気汚染物質は長距離輸送される過程で、化学的、物理的な影響を受け二次汚染物質へと変化する。その代表的なものとしては、都市域及びその周辺地域における窒素酸化物汚染、光化学大気汚染、二次生成エアロゾル汚染、並びに酸性降下物質汚染が挙げられる。大気汚染の長距離輸送は世界的にも大きな問題となっており、欧米では多国間の汚染の授受問題に発展している。

我が国においても東京首都圏地域からの大気汚染物質が内陸の地域に広域輸送される現象がしばしば認められる。このような大気汚染物質の長距離輸送は東京首都圏地域のみならず日本の各地域で観測されている。また酸性降下物質に関しても日本全国で欧米に匹敵する高濃度の硫酸塩、硝酸塩を含んだ降雨が観測されている。

本特別研究は大気汚染物質の列島規模の長距離輸送と輸送中に発現する種々の形態の大気汚染、すなわち都市型  $\text{NO}_2$  汚染、光化学オキシダント汚染、二次粒子汚染、湿性大気汚染、酸性雨等の生成機構と動態を解明し雲物理過程・混合反応過程等を含む数値モデルを開発すること及び列島規模大気汚染の予測手法を確立することにより大気保全計画に資することを目的として4年間にわたりとり行われたものである。

## 1.2 研究の目標と達成度

研究は5つの研究課題に沿って進められた。すなわち(1)雲物理過程・混合反応過程と、(2)複雑地形上の大気現象に関する基礎研究、(3)野外調査による列島規模の大気汚染・気象の動態把握。そして列島規模大気汚染の予測手法としての、(4)風洞予測手法と(5)数値予測手法の確立である。このようにして得られた予測モデルによって、光化学オキシダント、酸性降下物など列島規模大気汚染の気圏、土圏、水圏への負荷量、並びに生態系の影響の推定等を行い広域大気汚染対策のための汚染物質排出削減効果の検討を行った。本研究では列島規模大気汚染として、(1)太平洋沿岸—関東平野—中部山岳地域—日本海沿岸を結ぶ陸上を渡る大気汚染の長距離輸送と、(2)九州—日本海—朝鮮半島を結ぶ海上を渡る大気汚染の長距離輸送を研究対象とした。

陸上を渡る大気汚染長距離輸送機構としては種々の局地風が合体して形成される大規模風による長距離輸送機構が本研究によって初めて明らかにされた。また数値モデルを用いて長距離輸送中に起こる種々の大気汚染を統一的に予測する手法を確立した。このモデルを用いて窒素系、及び硫黄系汚染物質の収支と乾性沈着量を明らかにするとともに、発生源と環境濃度との関連性を定量的に評価した。

海上を渡る大気汚染長距離輸送機構としては、九州地域におけるフィールド観測データを基に

解析を行った。その結果、成層圏オゾンの沈降の詳細なメカニズムを初めて明らかにすることができた。また大陸方面からの汚染物質と天然起源汚染物質の流入、人為起源汚染物質と天然起源物質の相互作用、特に火山起源のSO<sub>2</sub>の変換プロセス及び雲、雨への取り込み過程を解明した。

## 2 研究の成果と概要

### 2.1 陸上を渡る大気汚染の長距離輸送

#### 2.1.1 沿岸地域から内陸山岳地域への大気汚染長距離輸送機構

##### (1) 熱的に誘起される局地風

気圧傾度によって生じる風（傾度風）が弱い晴天日には、種々の局地風が熱的に誘起される。このような局地風としては、海陸風、山谷風（斜面下降・上昇流）、台地—平地風などがある。さらに、局地風はしばしば結合して、より大規模な局地風を形成し、その中で汚染物質の長距離輸送が起こる。

大気汚染物質の主要発生源である大都市、工業地帯は臨海（あるいは臨湖）地域にあることが多い。臨海（湖）地域での大気汚染には海陸風（湖陸風）が重要な役割を担っている。海陸風は海・陸表面の温度差によって引き起こされる1日周期の流れで、メソスケール（100 km スケール）の大気循環を形成する。日中は、下層の海風と上層の補償風（反流）とで閉じた循環流を構成する。夜半にはパターンが逆転し、下層の陸風は4時頃最も盛んで、10時と22時頃になぎになる。また、海陸風の構造は気圧傾度や緯度のほか、海岸線の屈曲や陸地の起伏によって変化する。中緯度地域の海陸風では、日中海風層の厚さは600~900mで、夜半陸風層の厚さはやや小さく、反流層の厚さは1,000~2,000 m程度である。

上記の海陸風は海陸の温度差によって生じるが、これは温度差の1日平均値をゼロとしたときのものである。実際には、日本の場合、夏季、陸地の日平均温度の方が海面温度より高い。また、寒流に面する地域でもこのような温度差があり、これによって海から陸に向かう風が生じる。これを定常海風と呼ぶ。また、温度差が逆で陸から海に向かって生じる風を定常陸風と呼ぶ。これらが海陸風と重畳して臨海気候の季節変化や地域差を構成している。

単純な定常海風と海陸風に対して理論的な厳密解を求め、それらのフローパターンを比較してみると、海岸線に直角な風速成分Uの鉛直分布はほぼ相似で、下層に海風が吹き、その上に補償風が形成されて閉じた循環流を構成する。定常海風、海陸風は共に、海陸の温度差1度当たり海岸線付近で0.7m/s程度の風速を生む。また、海風層の厚さ、海風の範囲などもほぼ同じになる。このことから、海陸風と定常海風は同一のメカニズムによって生じると考えて差し支えない。逆に日周期変化は比較的遅いため海陸風は擬定常状態にあるということが出来る。このような相似性は、海岸線に直角な風速成分Uについていえる。しかし、大気中の流れでは、地球の自転に伴って生じるコリオリ力を介して、海岸線に平行な風速成分Vが生みだされ、Uと同じオーダーの強さになる。海陸風の場合にはV成分の生成が日周期変化に追従できず、特に上空では定常海風のV分布とは相当異なったものになる。

斜面の加熱、冷却に伴って斜面上昇、下降風が形成される。このとき、上空にはこれを補償す

る反流が形成され、山麓、山頂で閉じた山谷風循環を形成する。無限に長い斜面については、L. Prandtlが解析を行っており、これが観測や数値計算結果をよく説明できることが確かめられている。

平野部と山岳地域の間には、斜面風のほかに重要な局地風が形成される。いま、単純に、水平な平地と台地とがあり、これらの表面温度が同一振幅で日周期変化しており、これらの境界が鉛直な断熱壁で構成されている場合を考える。もちろん、台地と平地との高度差がない場合には運動は起きないが、高度差があれば台地—平地間に循環流が形成される。これを台地—平地風循環と呼ぶ。図1に日中のフローパターンを示す。大気下層には平地から台地に向かう風（平地風）が形成され、上層には反流が誘起されてメソスケールの大気循環を構成する。また、夜半にはフローパターンが反転し、大気下層には台地風が形成される。

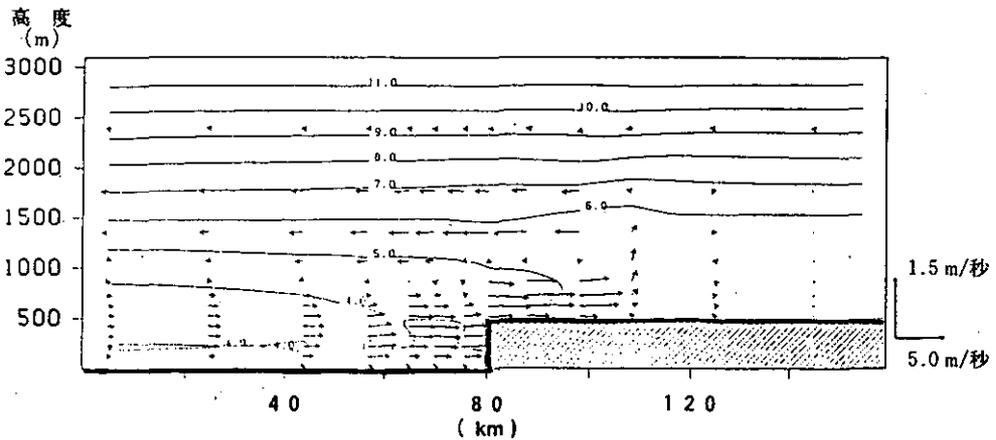


図1 台地—平地風最盛時の風速ベクトルと等温位線図

このような大気循環の強さは台地—平地間の高度差が増大するにつれて増すが、高度差が500 m程度以上になると一定値に漸近する。図1はこのときのフローパターンである。これを海風最盛時の海陸風のパターンと比較すると、平地上空の台地高度までの気層を除けばパターンはほぼ相似といてよい。台地上に限って言えば、平地風の層厚、侵入距離は海風のそれとほぼ同じであり、最大風速はともに温度差1度当たり0.7m/sになる。これらの相似性から、台地—平地風も海陸風と同様のメカニズムに従っているのではないかと推測される。実際、台地—平地間の高度差が十分大きければ台地高度での温度条件は海陸風の場合と同じになる。すなわち、高度差が十分大きいとき、平地上に形成される混合層や逆転層の影響は平地上空の台地高度にまでは及ばないため、そこでの温度は1日を通じてほぼ一定に保たれる。これに対して、同一レベルの台地表面温度は海陸風の場合の陸地温度と同一のパターンで日周期変化する。このようにして生じた水平方向の温度傾度が台地—平地風、海陸風を起動すると考えられるので、両者は本質的に同

一のメカニズムによっているということが出来る。また、上記の台地—平地風は、台地表面温度の日平均値が平地上空の台地高度の平均値と同一であるとしたときのものである。しかし、例えば中部山岳地帯の場合、夏季にはその日平均温度が周辺の平野部より2~4度高く、冬季にはその逆になる。このとき、定常海風の場合と同様、定常平地風あるいは定常台地風ともいべき風が形成され、しかも、これらの構造及びメカニズムは海陸風と同様のものであるということが出来る。

## (2) 局地風の結合

夏季の日中、臨海地域では海陸風と定常海風が重畳して大規模海陸風 (extended sea breeze) が形成される。海陸風と定常海風の相似性のため、これらが重畳してもフローパターン自体は大きく変化しないが、循環流の強さは増幅される。このため、海風の影響範囲 (例えば風速 0.5m/s 以上の地域) は拡大する。これに、高気圧から吹き出す傾度風が重なると影響範囲はさらに拡大し、大気汚染物質の輸送も 100 km にも及ぶことがある。米国西海岸地域ではこのような状態が何日も連続する。このとき、上空には高気圧の下降気流に伴う沈降性逆転層が形成され、これによって大気はふたをされた状態になって、閉鎖型の循環を形成する。このようなときには、排出された汚染物質は長時間にわたって蓄積され、その間に光化学反応が進行して高濃度のオキシダント汚染や二次生成エアロゾル汚染が発生する。ロサンゼルスLos Angelesの光化学大気汚染は特に有名で、ロサンゼルス・スモッグと呼ばれ、オキシダント濃度はときには 500~600 ppb にも達する。

日本の場合、臨海地域は幅が狭く背後に山岳斜面を控えている場合が多い。このときには、海陸風と斜面風が結合して、見掛け上、海陸風循環のスケールは拡大し、風速も強まる。また、斜面風の位相はほぼ斜面温度の位相に追隨していることから、これが海陸風と結合したとき、大規模循環の位相は純粋の海陸風の場合よりも 1~2 時間程度早められる。

平野部が十分広く、しかも山岳地域の面積も十分広いような場合、台地—平地風に比べて斜面風の寄与は比較的小さい。実際、台地—平地の境界に 500 m/20 km の斜面がある場合の日中のフローパターンをみると、斜面直上に斜面上昇流が形成されているものの全体のフローパターンは図 1 とほとんど同じで、台地—平地風が支配的であることが分かる。このことは斜面の勾配が変わったときにもいえ、平地—斜面—台地から構成される地域での局地風は、従来直感的に考えられていたような斜面風によるのではなく、台地—平地風によって起動されていると考えることができる。さらに、夏季には台地—平地風と定常平地風が重畳して、日中、山岳地域の中央部に中心を持つ熱的低気圧が現れ、山岳地域に向かう風は増幅される。逆に、冬季には夜間に熱の高気圧が形成される。海—平野—斜面—山岳から構成される地形の例として、関東甲信越地域の局地風と大気汚染の輸送を示したのが図 2 である。これは高気圧に覆われた夏季の晴天日の日中に見られる最も典型的なパターンである。臨海地域には海陸風、定常海風が形成され、斜面には山谷風が形成されるが、山岳地域の中央部に日中熱的低気圧が形成され、これに吹

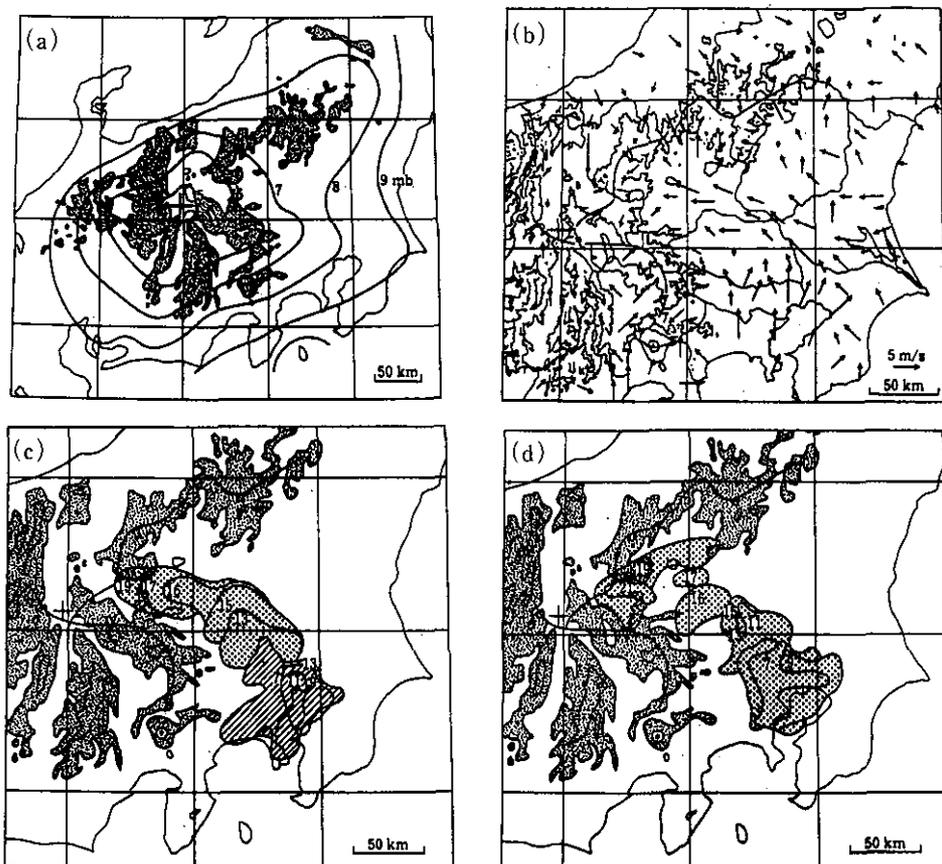


図2 大気汚染の長距離輸送

(a) 地上気圧, (b) 地上風ベクトル, (c) ガス状汚染物質の高濃度域の移動  
 (点線; オキシダント濃度 > 100ppb, 斜線; NO<sub>2</sub> 濃度 > 40ppb, 図中数字は時刻),  
 (d) 粒子状汚染物質 (sp) の高濃度域の移動 (sp > 90 μg/m<sup>3</sup>)

き込む台地—平地風, 定常平地風が種々の局地風を併合して大規模な風系を形成する。東京湾岸地域の工業地帯や大都市から大量に発生した汚染物質はまず関東平野を北上し, 平野部奥部で進路を西よりに変えて碓氷峠などの関東山地を越え, 中部山岳地帯の内部に侵入する。このとき, 高気圧に伴う沈降性逆転層が形成され, 上方への拡散が抑制されているため, 高濃度大気汚染の長距離輸送は 200km 以上にも及び, 汚染気塊が熱的低気圧の中心位置に到達するのは夜半になる。このため, 通常日中に起こる光化学スモッグは夜半に発生する。

### (3) まとめ

大気汚染長距離輸送の機構としては, 従来, 気圧傾度風 (季節風など) による長距離輸送が考

えられてきた。北欧、北米で見られるものはそれである。本研究では、これまでに述べてきたように種々の局地風が合体して形成される大規模風による長距離輸送が新たに見いだされた。

この種の長距離輸送は、暖候期、高気圧に覆われた晴天日に発生するもので、気圧傾度風がむしろ弱い場合に起こる。臨海地域では、海陸の日平均温度の違いによって生じる陸向きの風（定常海風）が、いわゆる海陸風循環を構成する海風と重なり、広域海風（extended sea breeze）を形成する。一方、内陸の山岳地帯では、日中、その中央付近に中心を持つ強い熱的低気圧が形成され、これに向かって周辺地域から台地平地風、定常平地風、斜面上昇流が吹き込む。これらの局地風は、高気圧に伴われて上空に形成される沈降性逆転層によりふたをされるため、簡単に合体して大規模風を形成し、これによって大気汚染物質が長距離輸送される。関東甲信地域の場合、まず、東京湾沿岸の大規模発生源地域で排出された汚染物質は、前日の陸風時、湾上に集積されて汚染気塊を形成する。この汚染気塊は翌朝再び上陸して大規模発生源の上空を通過する際に新たな汚染物質の供給を受けながら、日中関東平野を北上し、関東北部で進路を北西に変え、夕刻関東山地を越えて中部山岳地域内部に侵入する。この種の大気汚染長距離輸送は関東甲信地方の暖候期の最も典型的な輸送パターンであり、長距離輸送の到達点は熱的低気圧の中心位置までであること、後者は高低気圧配置により決定できることも示した。この種の長距離輸送は、局地風が日常的な風である中、低緯度地域では最も重要な輸送機構であると考えられる。

このような長距離輸送は中、低緯度地域で深刻な大気汚染をもたらす。それは、これが晴天時に発生するため光化学反応が急速に進行するためである。さらに重要なことは、局地風が地形に固有のものであるために、大気汚染の輸送経路が地形的に固定化されるためである。その結果、輸送経路にあたる地域は深刻な二次汚染に恒常的にさらされることになる。このことは、図3の高濃度オキシダントの発生時間数分布解析からも裏付けられた。

### 2.1.2 大規模観測と数値モデル

窒素酸化物 ( $\text{NO}_x$ )、硫黄酸化物 ( $\text{SO}_x$ ) や炭化水素 (HC) などの一次汚染物質は日射を受けて反応し、光化学オキシダント汚染、光化学スモッグをもたらす。さらに反応が進行すると硝酸塩・硫酸塩エアロゾル、湿性大気汚染、さらに酸性雨に移行する。本研究において用いた数値モデルには、気相反応として112個の素反応（53個の化学種）が含まれ、これらが連鎖状に、あるいは並列的に関与する。さらに、粒子生成機構として  $\text{HNO}_3$ （気相）—  $\text{NH}_3$ （気相）—  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ （固相、液相）の気—液—固平衡関係、さらに地面への乾性沈着、雲、雨への取り込み、液相反応過程を含む。

数値予測は、東京湾沿岸域から長野に至る大気汚染物質の長距離輸送が発生した1983年7月28～29日について実施した。観測結果の比較を図4から図9に示す。このような大気汚染の長距離輸送は夏季晴天日には最も頻繁に発生する輸送パターンである。東京湾沿岸地域で排出された  $\text{NO}_x$  と炭化水素は日射を受けて徐々に反応して光化学オゾン ( $\text{O}_3$ ) を生成し、その濃度（図4）

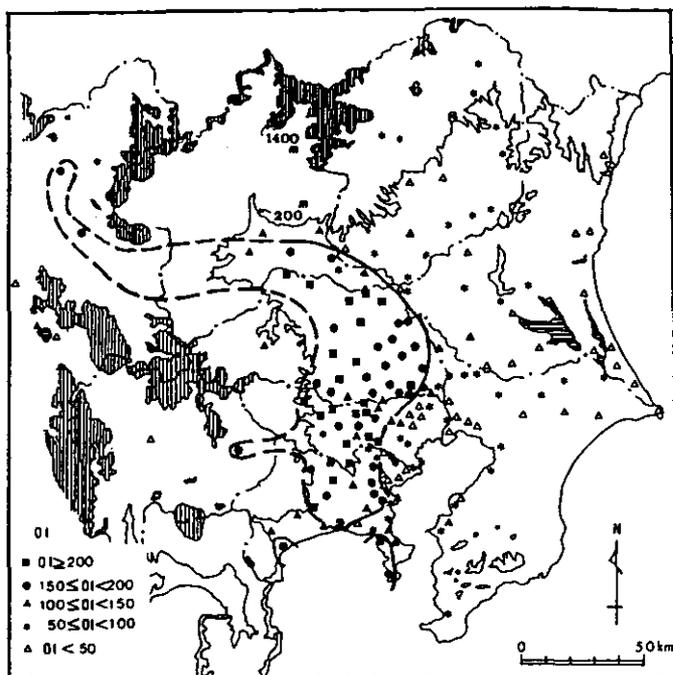


図3 オキシダント指数 ( $OI; O_x > 60\text{ppb}$ ) の分布

は浦和、高崎で100 ppbを超え、碓氷峠（軽井沢）を越えるころには150 ppbにも達する。また、この地域で日平均濃度（図5）も最大になる。一方、二酸化窒素（ $\text{NO}_2$ ）（図6）は大規模発生源地域で高く、東京、横浜では10～11時に環境基準を超える。汚染気塊が東京湾沿岸地域から流下するにつれて、 $\text{NO}_x$ は炭化水素との光化学反応により消費されてその濃度は減少するが、 $\text{NO}_2$ は反応により $\text{HNO}_3$ ガス、硝酸塩（図7）、パーオキシアセチルナイトレート（PAN）などに変質し、これらの濃度は浦和、高崎などで増加する。このように、 $\text{O}_3$ 、PAN、硝酸塩・硫酸塩などの二次汚染物質濃度は、浦和～高崎など関東平野北西奥部で最大になり、地表植物への暴露量も最大になる（図5）。

本数値予測は、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、一酸化窒素（NO）だけでなく、 $\text{SO}_2$ 、硫酸塩についても観測結果をよく説明している（図8、9）。また、各種の炭化水素やアルデヒド、ギ酸などについても観測値との良好な一致がみられる。以上のことから、本数値モデルの結果は光化学大気汚染、硫酸塩・硝酸塩汚染をほぼ忠実に予測していると考えられる。

本研究においては、関東から甲信地域に至る長距離輸送の経路に沿って大規模観測を実施し、種々の形態の大気汚染と気象要素の測定を行った。輸送経路が固定化されることは大気汚染物質の物理・化学過程（輸送、拡散、反応、粒子化、乾性沈着、雲物理・化学過程、湿性沈着）を観

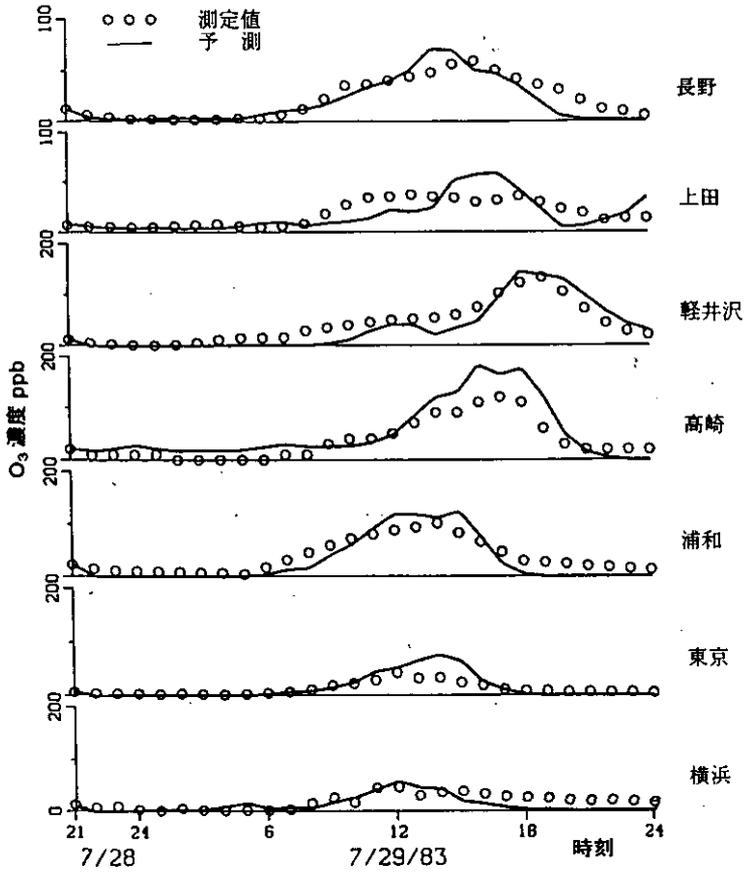


図4 大気汚染長距離輸送日のオゾン濃度観測結果と予測結果の比較

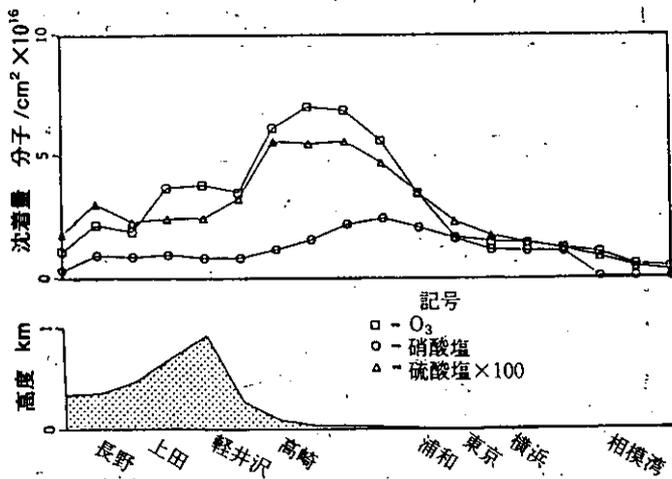


図5 大気汚染長距離輸送日の二次汚染物質の地面への沈着量の分布

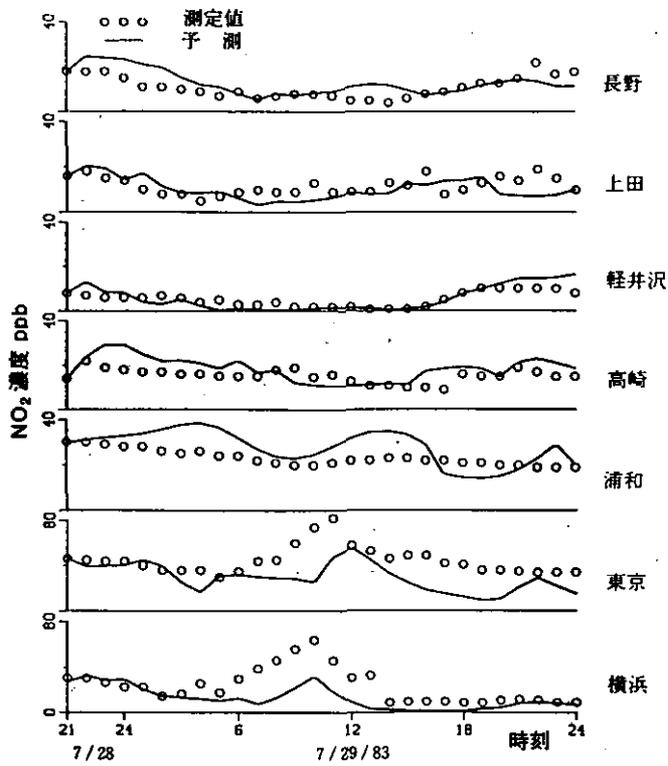


図6 大気汚染長距離輸送日のNO<sub>2</sub>濃度観測結果と予測結果の比較

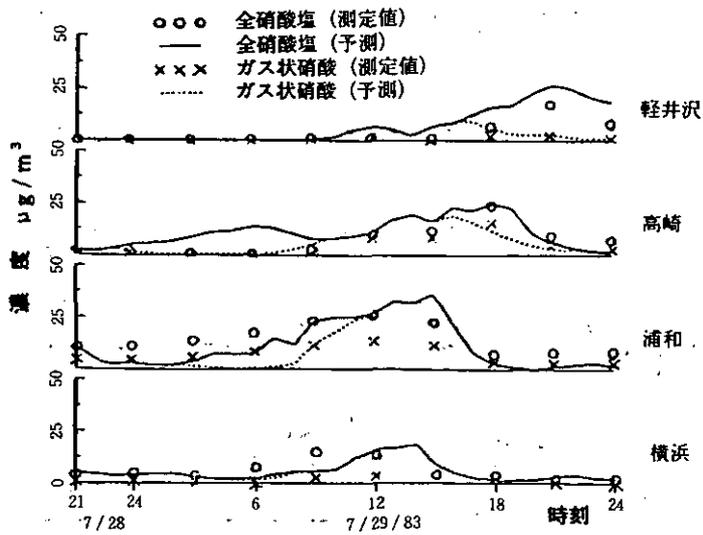


図7 大気汚染長距離輸送日のHNO<sub>3</sub>ガス、硝酸塩濃度観測結果と予測結果の比較

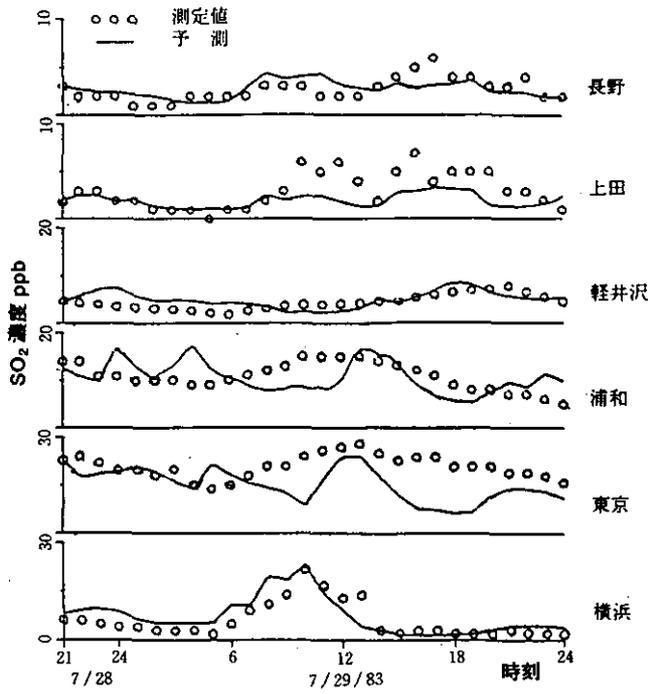


図8 大気汚染長距離輸送日のSO<sub>2</sub>濃度観測結果と予測結果の比較

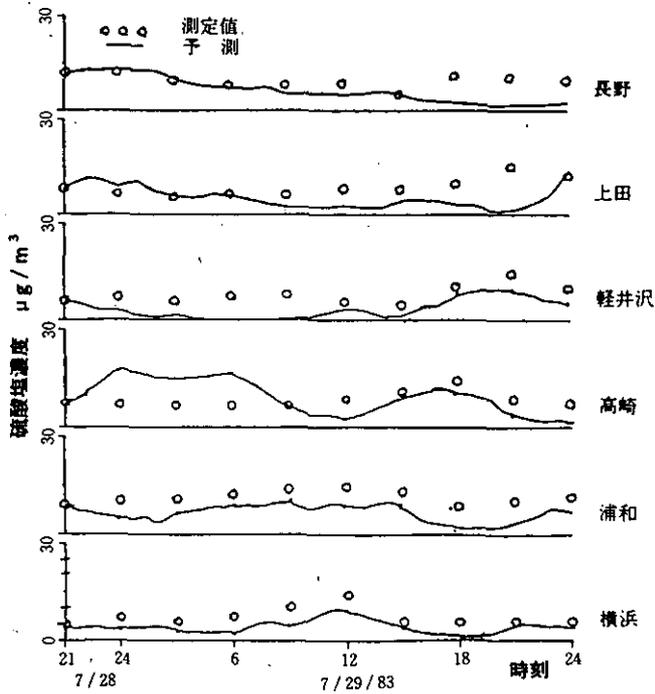


図9 大気汚染長距離輸送日の硫酸塩濃度観測結果と予測結果の比較

測するのに好都合である。これまでに述べてきたようにこの結果は、最も整然としたデータセットとして、また数値モデル検証のための標準データセットとして質の高いものである。

数値モデルとして、輸送、拡散のほかに、反応、粒子化、沈着を含んだオイラー型のモデルを完成させた。種々の形態の大気汚染のすべてを一つのモデルで予測するためには、高度な反応モデルが必要であり、気相反応モデルは Atkinson らのものを用いている。ガスからエアロゾルへの変換率（粒子化）の予測では  $\text{HNO}_3\text{-NH}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3$  系などの気液固平衡が成立していると仮定した。また、乾性沈着量の予測では各々の汚染物質について一定の沈着速度を仮定した。酸性雨の生成機構モデルは、降雨に至る雲物理過程のモデルと雲粒や雨滴、雪への汚染物質の取り込み（あるいは蒸散）モデル、液相での反応モデルからなる。液相反応モデルは、Chameides & Davis, Chameides の反応モデルを一部修正したもので、35 の反応種、53 の素反応を含む。これにより、一次汚染物質である  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  及び各種炭化水素（パラフィン、オレフィン、芳香族）及び二次汚染物質（酸化性ガス状物質、二次粒子、酸性雨）の挙動がほぼ再現できた。

### 2.1.3 夏季長距離輸送中に起こる種々の大気汚染

夏季における大気汚染長距離輸送発生時の各種大気汚染（図 10）について、観測データの解析と数値シミュレーションから、次の結論が得られた。

#### (1) 都市型 $\text{NO}_2$ 汚染

本研究では、 $\text{NO}_2$  問題は  $\text{NO}_x$  単独の問題としてではなく、 $\text{NO}_x$ —炭化水素系の光化学反応の一環として考えることの必要性を定量的に示した。すなわち、直接排出される  $\text{NO}_2$  は  $\text{NO}_x$  のわずか 10% であり、残りの  $\text{NO}$  が  $\text{O}_3$  や過酸化ラジカル ( $\text{RO}_2$ ) と反応することにより、 $\text{NO}_2$  が生成される。またこれら  $\text{NO}_2$  は  $\text{OH}$  ラジカル、 $\text{RCO}_3$  との反応により日中は数時間の寿命しかないことを考慮に入れる必要がある。夜間は  $\text{NO}$  が過剰状態にあるため、 $\text{NO}_2$  の反応生成は  $\text{O}_3$  や  $\text{RO}_2$  の供給量によって決まり、反応生成される  $\text{NO}_2$  濃度は 30~40 ppb（冬期では 20~30 ppb）と推定される。このため、 $\text{NO}_2$  濃度と  $\text{NO}_x$  濃度の日変化パターンは異なり、 $\text{NO}_x$  濃度は車走行量と大気拡散能に強く依存して 8~10 時と 21~24 時とにピークを持つのに対して、 $\text{NO}_2$  濃度のピークは、夜間は  $\text{NO}_x$  のピーク時間の 2~3 時間前に現れ、朝は 2 時間程度遅れる。また、 $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  の高濃度はいずれも大規模発生源地域内に現れるが、それら高濃度の発生位置はずれる。

#### (2) 光化学 $\text{O}_3$ , PAN, $\text{H}_2\text{O}_2$ 汚染

光化学  $\text{O}_3$  は、 $\text{NO}_2$  が光解離で  $\text{NO}$  に還るときに生成する酸素原子と、酸素分子との反応によって生成される。上記の  $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$  酸化過程とこの光解離過程とで 1 つのサイクルをなしており、この反応サイクルを 1 回通るごとに  $\text{O}_3$  は 1 分子ずつ生成される。図 10 に示したように、大都市域では  $\text{O}_3$  濃度は正午頃ピークに達する。しかし、この汚染気塊が内陸地域に輸送される際には反応がさらに進んで、 $\text{O}_3$  濃度は浦和、高崎で 100 ppb を超え、碓氷峠（軽井沢）を越えるころに

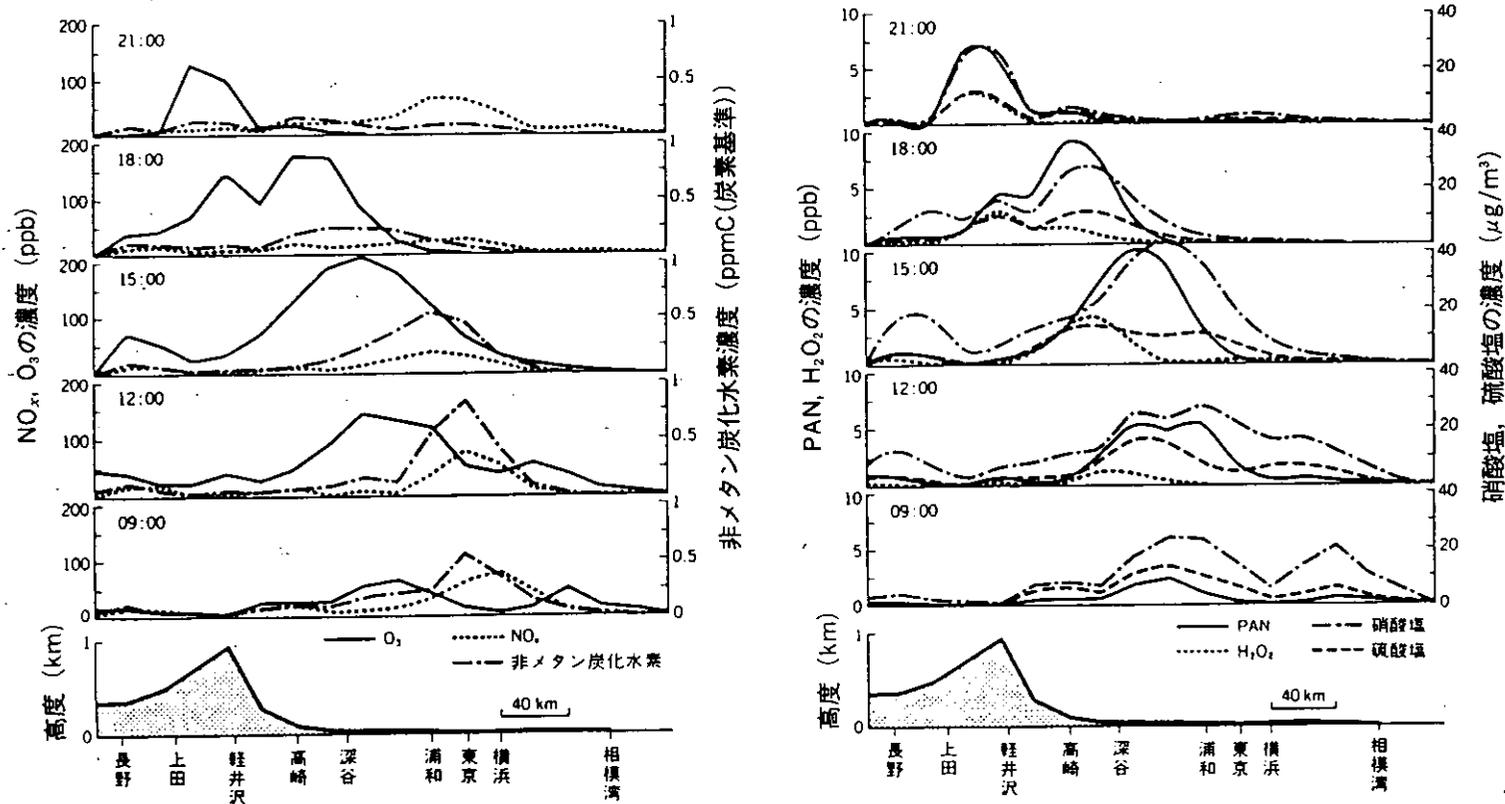


図10 長距離輸送の経路に沿っての汚染物質の濃度分布とその時間変化

は150 ppbにも達する。輸送時間遅れを反映してピーク時間の遅れが生じ、中部山岳地域では夕方から夜半にO<sub>3</sub>濃度のピークが現れる。PANもO<sub>3</sub>とほぼ同一の速度で生成され、その濃度はO<sub>3</sub>濃度の1/10程度に達する。過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)濃度も数ppbにまで達する。

### (3) 二次生成粒子汚染(硫酸塩、硝酸塩、硫酸ミスト)

気相での光化学反応が進行すると、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、NO<sub>2</sub>は酸化されて、硫酸、硝酸に転換される。夏季の関東甲信地域の大气汚染長距離輸送の場合、NO<sub>x</sub>→NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の変換はO<sub>3</sub>の生成とほぼ並行して進行し、平均変換速度は14.7%/hに達する。これは浦和付近ではほぼ完結する。それに反して、SO<sub>2</sub>の酸化は3.7%/hで、NO<sub>x</sub>変換速度の1/4程度にすぎない。

生成した硝酸(HNO<sub>3</sub>)はガス状あるいは硝酸アンモニウム(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)の固体状粒子あるいは液滴として存在する。すなわち、HNO<sub>3</sub>(ガス)+NH<sub>3</sub>(ガス)→NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>(固体あるいは液滴)の平衡関係が成立する。高温低湿条件ではガス状で存在するが、低温で相対湿度が潮解限界以下では固体粒子に、それ以上では液滴になる。この解離定数は気温10℃の減少(相対温度一定条件)でおよそ1桁減少し、気温が一定でも潮解限界以上の湿度域で急減し、相対湿度が94%で1桁、98%でさらに1桁減少する。実際、汚染気塊の流入時に、浦和及び高崎ではガス状硝酸が顕著に増加するのに対して、軽井沢では粒子化が進行して硝酸塩エアロゾルが増加する。これは、軽井沢(海拔高度:1,000m)では関東平野に比べて気温が約10℃低く、相対湿度は高くなり、平衡関係がエアロゾル側に片寄るためである。一方、硫酸は熱力学平衡からほとんど全量が粒子化する。一部は、それ自身が凝縮した形の、硫酸ミストとして存在する。また、NH<sub>3</sub>ガスなどと反応して硫酸塩エアロゾルになる。硫酸塩、硝酸塩、硫酸ミストの増加は視程悪化や酸性雨の原因となる。実際、軽井沢では、長距離輸送の影響のない時間帯では陰イオンとしてのSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>と、陽イオンとしてのNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>とで良好なイオンバランス(相関係数=0.996)が保たれるが、汚染気塊の流入時には硫酸ミストや硫酸水素塩によってもたらされる高濃度のH<sup>+</sup>イオンが付加される。

### (4) 二次生成粒子汚染(炭化系エアロゾル)

本研究では、大規模観測時に浮遊粒子状汚染物質中の炭素系エアロゾルの重要性を確認し、二次生成を含む挙動を調べた。長距離輸送されたエアロゾル粒子中では、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンは、それぞれ、全質量の14%、10%、7%、程度であり、水溶性の全無機イオンを合計してもせいぜい35%にしかすぎない。残りのほとんどは炭素系エアロゾルである。この炭素系エアロゾルは、スス等の元素炭素(EC)と極性有機炭素(POC)と非極性有機炭素(NPOC)とに分けられる。反応の進んだ高崎では、広域大气汚染発生時、炭素系エアロゾルはロサンゼルスと同じく、ほぼ半量(全質量の43%)を占める。また、これを構成するEC、NPOC、POCはそれぞれ全質量の16%、10%、17%を占める。このうち、EC及びNPOCの大半は一次発生源から排出

された炭素であると考えられる。光化学反応による POC の二次生成量は全有機エアロゾルの 40~50%、したがってエアロゾルの全質量の 11~14% に達すると推定される。二次生成有機エアロゾルの主要なものはジカルボン酸で、そのほかに高級アルデヒド、高級のモノカルボン酸も含まれる。これらは、炭化水素が酸化されてアルデヒドに、さらに酸化されてカルボン酸に変質する過程で、高沸点成分が順次粒子化する。代表的な有機エアロゾルであるジカルボン酸は、その濃度が O<sub>3</sub> とほぼ同じ日変化を示し、日中高く、夜間極端に小さくなる。他の有機エアロゾル成分としては、植物起源のテルペン類の酸化物であるピノンアルデヒド等の寄与も大きい。

### (5) 酸性雨

大規模観測では、酸性雨、酸性霧の体系的な観測はできなかったが、大気汚染長距離輸送中の雷雨時のデータが得られた。これにより、本数値モデルを用いた数値予測の妥当性が検証されている。輸送経路上の深谷から上田にかけて 1 mm/h (一定強度) の降雨が 13~17 時に発生した場合 (日中の降雨) と、17~21 時に発生した場合 (夕刻の降雨) の 2 つのケースについての数値予測と観測結果から以下のことがいえる (表 1)。

降水中の硫酸塩、硝酸塩濃度は降雨地域の風上側で最大値をとり、風下側で急減する。ただし、山上での濃度は雲中での反応過程を反映して上昇する。降水中の硫酸塩の 50% は凝縮核を構成する二次粒子である。残りの 50% は雲粒及び降雨滴に気相から取り込まれた SO<sub>2</sub> と、同時に取り込まれた H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> との反応によって生成される。溶解性の極端に高い H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> が消費されると、反応生成は O<sub>3</sub> との反応で進行する。この降雨に伴う硫酸塩の湿性沈着量は、降雨期間中の乾性沈着の 1,000 倍を越す。このことから、晴天時生成されて長時間大気中に滞留する硫酸塩やエアロゾルの除去には降雨が重要な役割を果たしていることが結論付けられる。一方、降水中の硝酸は、凝結核を形成する硝酸塩エアロゾルと、ガス状硝酸の溶け込み分によって構成されており、液相

表 1 降雨時の乾性、湿性沈着量及び気相、液相反応量の比較、単位、molecules、降雨領域：深谷～上田、降雨期間：13~17時(日中降雨)、17~21時(夕刻降雨)

	乾性沈着量*	湿性沈着量*	液相反応量*	気相反応量*	総 降雨前	量* 降雨後
日中降雨						
SO <sub>2</sub>	1.3(22)	3.2(22)	-8.6(22)	-6.3(22)	3.6(23)	2.2(23)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.6(20)	1.8(23)	8.6(22)	6.3(22)	4.2(23)	3.4(23)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.7(22)	3.6(23)	2.6(18)	2.9(23)	7.9(23)	4.9(23)
夕刻降雨						
SO <sub>2</sub>	1.3(22)	3.8(22)	-1.6(23)	-3.0(22)	3.1(23)	1.7(23)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.5(20)	3.7(23)	1.6(23)	3.0(22)	4.3(23)	3.2(23)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.5(22)	5.7(23)	4.3(19)	3.5(23)	6.0(23)	4.0(23)

カッコは10の指数、例えば1.3(22)=1.3×10<sup>22</sup>、\*は降雨期間中全計算領域(相模湾～長野)についての値。

での反応生成の寄与は小さい。また、硝酸の除去機構としては、この湿性沈着とガス状硝酸の乾性沈着とが同オーダーである。また、降雨期間を通じての湿性沈着量の積算値を比較すると、硝酸塩の沈着積算量は硫酸塩の1.5～2倍である。このことにより硝酸塩は硫酸塩よりも速く大気中から除去される。

#### 2.1.4 冬季の都市型 NO<sub>2</sub>、二次粒子汚染

都市域における NO<sub>x</sub> 及び浮遊粒子状物質 (SPM) の高濃度汚染は11～12月に顕著になる。この時期は季節風の変わり目で気圧傾度風が弱く、晴天日が多いため、晴夜放射逆転が特に強まることと密接に関連している。本研究では、都市気象の観測と数値モデルから、平均建物高度の2～4倍の高度に30～50m程度の厚みの逆転層 (elevated inversion) が形成され、逆転層強度は温位差が数度のものになること、地表付近の気流は建物による機械的かく乱のために中立成層に近く、ヒートアイランド現象は人工排熱によるよりは、都市境界層上空からの高温大気の機械的かく乱によるエントレインメントが原因であることを示した。

さらに、本研究では、東京首都圏地域の NO<sub>x</sub>-SO<sub>x</sub>-炭化水素系の光化学反応を上記数値モデルを用いて再現させ高濃度汚染の発現原因を検討した。高濃度の発現には、強い逆転層の形成だけでなく、冬季でも進行する光化学反応が重要な役割を果たすことを示した。また、冬季の都市型 NO<sub>2</sub> 汚染や二次粒子汚染の特性を検討した。しかし、冬季の大気汚染の大規模観測はまだまだ行われておらず、その動態には不明な部分が多い。

#### 2.1.5 窒素系汚染物質、硫黄系汚染物質の収支と乾性沈着量

数値モデルを用いて、輸送、反応、粒子化、沈着など汚染物質の一連のライフサイクルの詳細な検討を行った。夏季、晴天日の窒素系、硫黄系汚染物質の収支を図11に示す。窒素系汚染物質の場合、硝酸生成は気相反応により進行すること、ガス状硝酸・アンモニアと硝酸アンモニウム間に気液固平衡が存在すること、ガス状硝酸の沈着速度 (約2 cm/s) が他の汚染物質よりはるかに大きく (ガス状 NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> の5倍、粒子状硫酸塩、硝酸塩の100倍)、乾性沈着の機

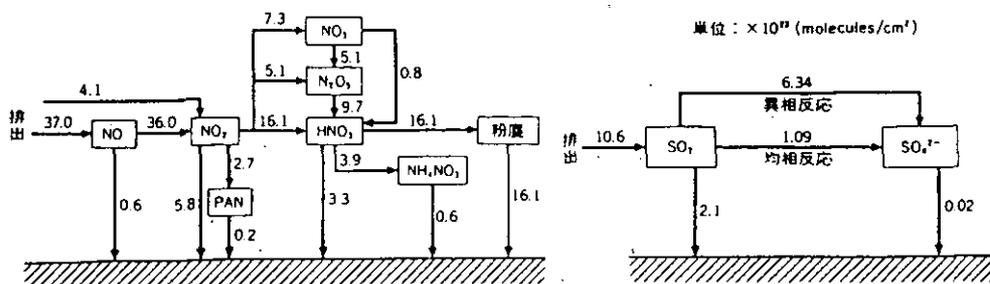


図11 1日を通しての窒素系、硫黄系汚染物質の収支

構として、地表に直接沈着するもののほかに、これより重要なものとして、硝酸が大粒子に沈着し、これが地面に沈着するという除去機構のあることを新たに見いだした。大粒子に含まれる  $\text{NO}_3^-$  イオンが  $\text{SO}_4^{2-}$  に比べて多いのはこのためである。さらに、1日を通しての窒素系汚染物質の収支として、排出された  $\text{NO}_x$  は種々の反応経路を経て、硝酸、硝酸塩に転換され、1日でその過半が地面に沈着することを示した。

硫黄系汚染物質の場合、 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$  変換過程には浮遊粒子表面での異相反応が支配的であること、1日を通しての硫黄系汚染物質の収支では、排出された  $\text{SO}_2$  の約20%は  $\text{SO}_2$  の形のまま地表へ乾性沈着し、残りの  $\text{SO}_2$  はほとんどは硫酸ミスト、硫酸塩エアロゾルに変換されるが、粒子状で地表沈着するのは  $\text{SO}_2$  の地表沈着の1/100で、硫黄系汚染物質の大半は硫酸塩粒子の形で大気中に残留する。これは二次粒子に共通の特性で、粒径が0.1~1.0 $\mu\text{m}$  範囲にあって、乾性沈着速度が極端に小さく(0.01cm/sのオーダー)、この除去は主に雨、霧などの湿性沈着によるしかない。しかし、硝酸塩の場合は特別で、いったん生成された粒子は平衡関係を通してガス状硝酸に戻って大量に沈着除去される機構があるため、 $\text{NO}_x$  排出量は  $\text{SO}_x$  排出量の4倍程度であるにもかかわらず、硝酸塩粒子濃度は硫酸塩粒子濃度と同じレベルになる。

これらの二次汚染物質は地面に沈着して植物、土壌、湖沼などにインパクトを与える。広域大気汚染の発生した日の1日にわたっての二次汚染物質の沈着量の最大になる位置はそれぞれの大気汚染物質の反応性によって異なるが、いずれも大規模発生源地域ではなく、大気反応で濃度が増した関東奥部地域である。

### 2.1.6 排出量の削減効果の検討

大気汚染の長距離輸送が出現した日について、数値モデルを用いて、汚染物質の排出量の削減効果の試算を行った。全領域で  $\text{NO}_x$  (=  $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) 排出量を50%カットした場合、大規模発源地域の東京、横浜では  $\text{O}_3$  濃度は逆に増大し、現状の1.5倍にも達する。これは、排出される  $\text{NO}_x$  は光化学反応の原因物質であると同時に、 $\text{NO}$  は生成された  $\text{O}_3$  を消費する( $\text{NO}_2$  を生成する)役割も果たしていることによる。このとき、 $\text{NO}_2$  への効果としては20~30%の濃度減少がもたらされる。しかし、硝酸塩による二次粒子汚染については、大規模発源地域では削減効果がほとんどなく、遠隔地域の浦和—高崎間で30%程度の濃度減少がもたらされる。

一方、 $\text{NO}_x$  の排出量を現状のままにして炭化水素の排出量だけを50%カットすると、東京、横浜では  $\text{O}_3$ 、硝酸塩ともにその濃度の大幅な低減が見込まれる。しかし  $\text{NO}_2$  濃度への効果は少ない。さらに、 $\text{NO}_x$  及び炭化水素の排出量とともに50%カットした場合には、 $\text{O}_3$  濃度は東京湾、相模湾上を除いて東京から長野全域で現状とほとんど変わらないが、硝酸塩濃度については大幅な低減が見込まれる。このように排出量の削減効果は非常に非線形であり、すべての形態の大気汚染の軽減に有効な排出量削減シナリオは、種々の高濃度発生気象条件に対する計算から最適なものを決定しなければならない。高濃度  $\text{O}_3$  の出現に及ぼす人為起源の窒素酸化物と炭化水素の

寄与の程度はそれぞれの物質の境界濃度や初期濃度等の計算条件によって大きく異なる。また計算に用いた三次元メッシュの取り方やそのときの気象条件、特に風の立体分布や大気安定度、によっても変化する。今回の試算結果は特定の気象条件、計算条件での一例であり今後さらに多数の例について試算を行い、一般的な結論を導くことが重要である。特に自然起源の発生源も含めた炭化水素濃度の境界条件に関してはフィールド観測も含めた研究が今後是非とも必要であろう。

### 2.1.7 スギの衰退と二次汚染物質

関東地域全域と甲信地方の一部におけるスギの衰退状況を調査し、その原因として考えられる二次汚染物質や降雨量の分布との関連を検討した。二次汚染物質の指標として、一般環境大気測定局測定のおキシダント ( $O_3$ ) 濃度の1時間値が0.06 ppmを超えた時間数の5~9月(暖候期)の合計(1980年から5年間の平均値)を $O_3$ 指数(OI)として定義した(図3)。

スギの中害・激害地帯は高い $O_3$ 指数の分布地域とほぼ重なる。これらが一致しない地区(群馬県松井田から軽井沢を経て上田に至る間と山梨県大月市)も見られたが、これは降雨量と関係しており、降雨量が余りにも多いことは被害を少なくする働きがあると考えられる。

被害樹の周辺土壌分析や主風向との関連調査を実施しているが、このスギの衰退の原因はどの種の二次汚染物質であるかはいまだ不明である。しかし、この数年間で衰退が進行していることが確認された。

## 2.2 海上を渡る大気汚染の長距離輸送

日本は島国であるため海上を渡る大気汚染の挙動を知ることが重要である。このため九州地域をフィールドとして研究を行った。九州地域においては人為起源と自然起源の大気汚染が複合して出現する。九州地域における大気汚染の特徴として、春季に $O_3$ の濃度が最大となり夏季に最小となること、 $SO_2$ の広域的な高濃度が観測されることがあること、降水中の $SO_4^{2-}$ の濃度が相対的に高いことなどが挙げられる。これらは九州の広い地域で同時に観測されることが多い。春季の高濃度 $O_3$ は成層圏 $O_3$ の沈降によるものと人為起源による大気汚染物質が海上を長距離輸送されることにより出現することが分かった。また $SO_2$ の広域汚染には鹿児島県桜島から放出される $SO_2$ が長距離輸送されその過程で $SO_4^{2-}$ に変換され、一部は降水中に取り込まれ九州北部地域に降下することが明らかとなった。以下にその研究成果を具体的に示す。

### 2.2.1 成層圏 $O_3$ の地上への輸送現象

春季には中緯度地方の地上において $O_3$ の濃度が上昇することはよく知られた事実である。これは成層圏 $O_3$ の沈降によるものであるが、そのメカニズムについてはまだ十分解明されていない。このことを明らかにするために図12に示す九州北部地域において観測を実施し、得られた

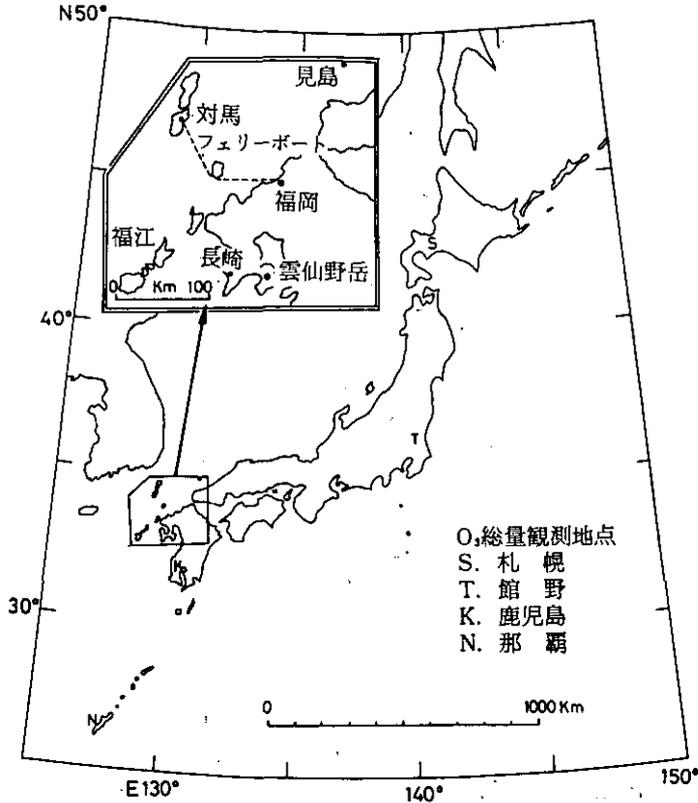


図12 観測地点図

$O_3$ の垂直分布観測(対馬)地上の $O_3$ 濃度観測(対馬, 雲仙野岳)海上の $O_3$ 濃度観測(福岡-対馬フェリーボート)気象官署(対馬, 福岡, 長崎)。

データを日本の4地点(札幌, 館野, 鹿児島, 那覇)で測定されている $O_3$ 総量のデータ, 及び高層気象観測データとともに解析した。観測の結果地上の $O_3$ 濃度は図13に示すように九州北部地域はほぼ全域において地上の気圧が上昇するとともに上昇していた。一方 $O_3$ 総量濃度の時刻変化は地上の $O_3$ 濃度の時刻変化と少し異なった動きを示している。1986年5月10~19日の間の $O_3$ 総量濃度の緯度-時間断面図, 及び対馬を通る東経130°上空におけるジェット機流中心軸の南北変動の動きを図14に示す。 $O_3$ 総量は地上での $O_3$ 上昇より約1日早い位相のずれがあることが分かる。これは以下のような2つの主要なメカニズムによるものであることが分かった。

まず第1に成層圏 $O_3$ は寒冷前線に吹き込む北~西系の下降流により対流圏の上層に輸送される。この寒冷前線は, 地球全体を取り巻く波数4~5のプラネタリー波が北上する西側の地域に形成された低気圧に伴うものである。また $O_3$ 総量はジェット気流の北側で増大しており, このジェット気流はプラネタリー波が南下するに伴って南下する。第2に対流圏上層に輸送された成層圏 $O_3$ は低気圧が通過した後に引き続き出現する移動性高気圧の影響下でゆっくり下降する。

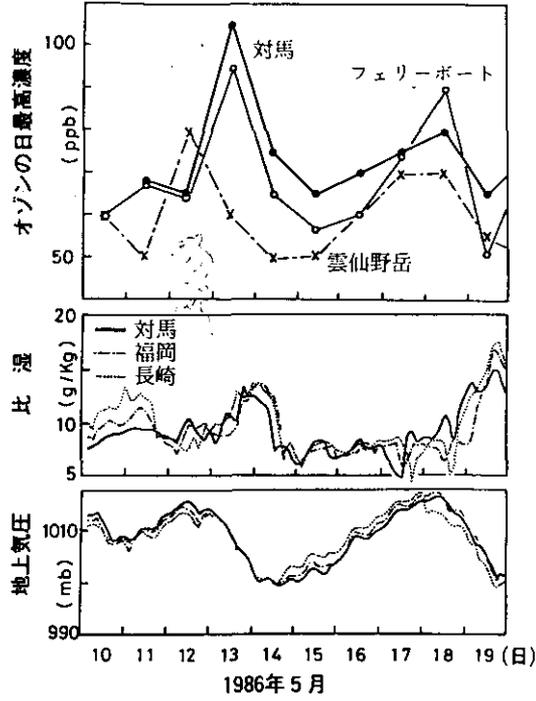


図13 1986年5月10～19日にかけて対馬，フェリーボート，雲仙野岳において観測したO<sub>3</sub>濃度(UV法による)の最高値と対馬，福岡，長崎における比湿と気圧の日変化

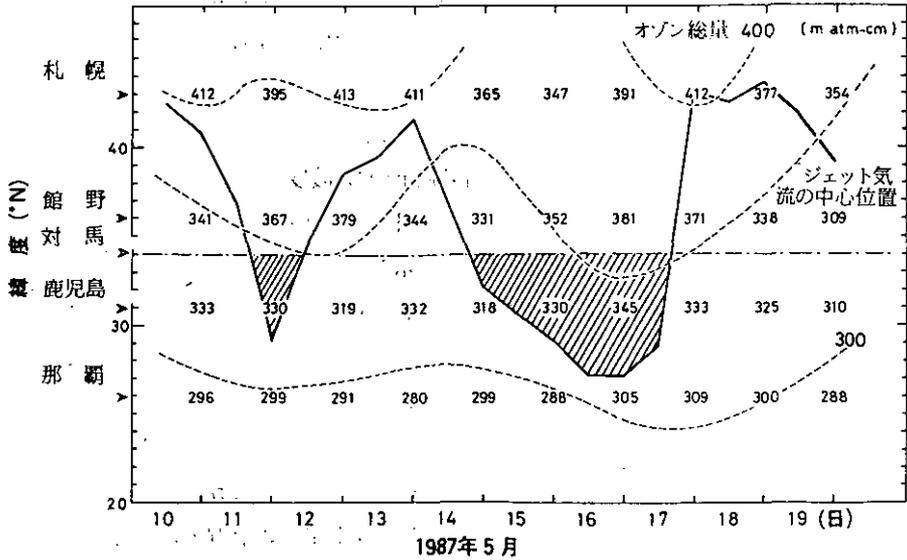


図14 1986年5月10～19日間のO<sub>3</sub>総量濃度の緯度—時間断面図，及び東経130°(対馬)におけるジェット気流中心軸の時刻変化

このときにはプラネタリー波は北上しておりジェット気流もこれに伴って北上しているためO<sub>3</sub>総量は減少する。また、対流圏をO<sub>3</sub>が下降するときには局所的に形成される気温の逆転層、又は安定層がO<sub>3</sub>を保持する役割を果たしていることが分かった。このような引き続いて起こる2つのメカニズムによりジェット気流の動きとO<sub>3</sub>総量との間には1日のずれが生じ、さらにO<sub>3</sub>総量と地上でのO<sub>3</sub>濃度との間にも1日のずれが生じる。

このことから、春季において地上でO<sub>3</sub>が上昇する時期や地域等については、ジェット気流の南北方向の動きや、日本5か所で観測されているO<sub>3</sub>総量の観測データ等を利用することにより事前の予測が可能である。

### 2.2.2 火山からのSO<sub>2</sub>の長距離輸送

日本全国で固定並びに移動発生源から排出されるSO<sub>2</sub>の量は一年間に約100万トンである。一方桜島南岳からのSO<sub>2</sub>発生量は1日当たり1,000～2,000トンと推定されている。この量は一年間で37～63万トンに相当し日本全国の排出量の4～6割に当たる。

桜島南岳は標高が1,060mで、排出ガス温度が高いため排煙は気象条件によっては上空2,000m以上まで上昇する。この高度では大気は安定成層となっているため排煙はあまり拡散されことなく長距離輸送されると考えられる。この現象を把握するために航空機による観測を実施した。図15には1987年5月9日に実施した観測結果の一部を示す。長崎県の五島列島の北東海上で100ppb以上の高濃度のSO<sub>2</sub>が認められる。このブルームがどのような経路でこの地点に達したかを知るために、全球客観解析データを用いて流跡線解析を行った。その一例を図16に示す。この期間の風系は九州の南部では南東風、北部では南西風となっていた。これは本州南海上に中心を持つ移動性高気圧の周縁部にこの地域が位置していたためにこの等圧線に沿った流れ場が形成されていたためである。図16は桜島からの排煙の高さにほぼ相当する850mb面の流跡線であるが、桜島からの煙が南東から南西に回り込むような気流場に乗って排煙後12時間程度後に五島列島北東海上に達したことが明らかとなった。このような桜島からのSO<sub>2</sub>が九州地域に及ぼす影響の程度を把握するために桜島南岳とほぼ等しい高さの長崎県雲仙野岳(標高1,142m)において1987年8月からSO<sub>2</sub>の連続測定を行った。その結果1987年8月～1988年4月と1989年5～7月までの間の1時間平均値のうち約97%は10ppb以下であったが、50ppbを超える高濃度が20回(0.2%)観測され最高値は298ppbを示した。このような高濃度が雲仙野岳で出現したときの鹿児島における850mbの風は東風から南西風に集中しており約86%がこの風系であった。しかし雲仙野岳で高濃度が出現したときには地上でも高濃度が出現するといった単純な関係にはないことが地上データを解析した結果明らかとなった。そこで地上における高濃度の出現と気象パターンとの関係を解析したところ、長崎県や福岡県等の九州北部地域において、地上で高濃度のSO<sub>2</sub>が広域にわたり出現するときの気圧配置の共通した特徴として、九州地域が移動性高気圧の周縁部もしくはその後面に位置した場合がほとんどであることが明らかとなった。このよ

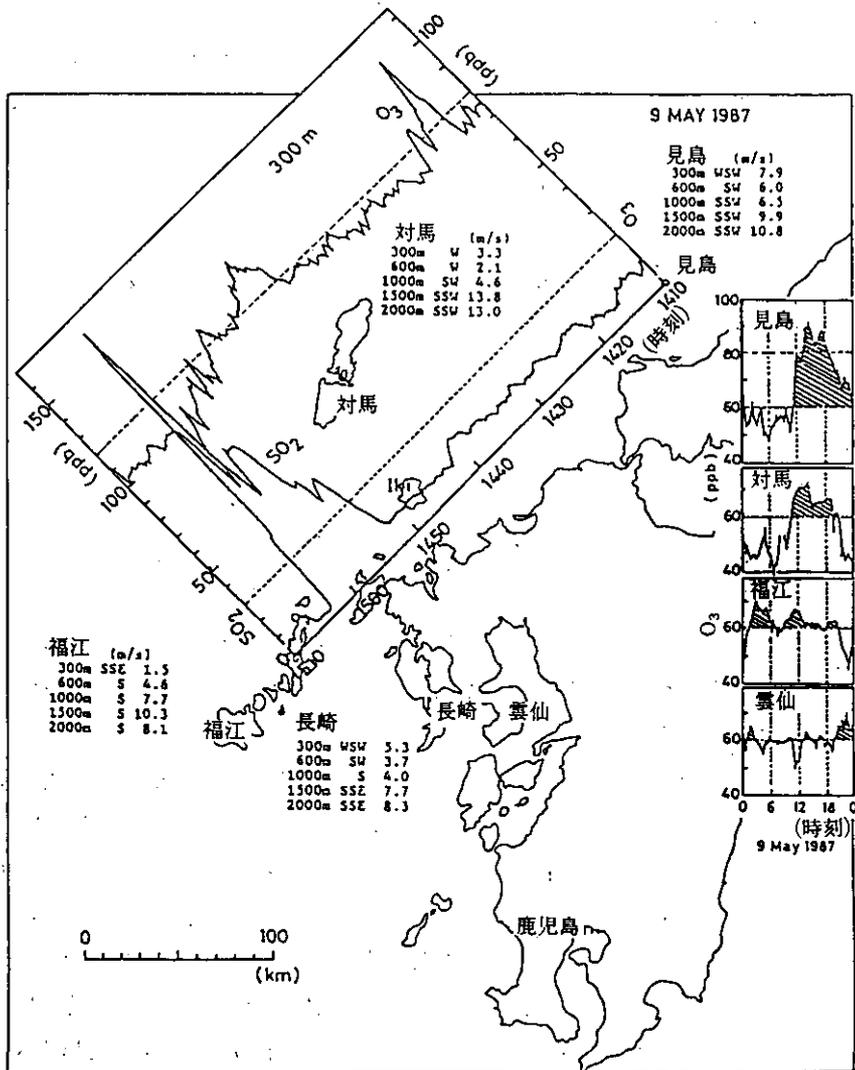


図15 1987年5月9日に見島、対馬、福江、雲仙野岳(1,142m)で観測したO<sub>3</sub>の日変化及び海拔300mの高度での航空機観測によるO<sub>3</sub>とSO<sub>2</sub>の分布  
 航空機観測は5月9日、14時10分～15時10分に見島と五島列島の間で実施した。  
 見島、対馬、長崎、福江で実施した15時の上空2,000mまでの風向風速も図中に示した。

うな気圧配置のときには一般に空気の沈降、及びそれに伴う逆転層が形成されることが考えられる。図15に示した1987年5月9日の場合には地上においても高濃度のSO<sub>2</sub>が観測されたが、この期間における気流の垂直方向の挙動を知るために比湿の時刻高さ断面分布を図17に示した。比湿は保存量であるため気塊の垂直方向のトレーサーとなる。地上で高濃度が出現した9日には

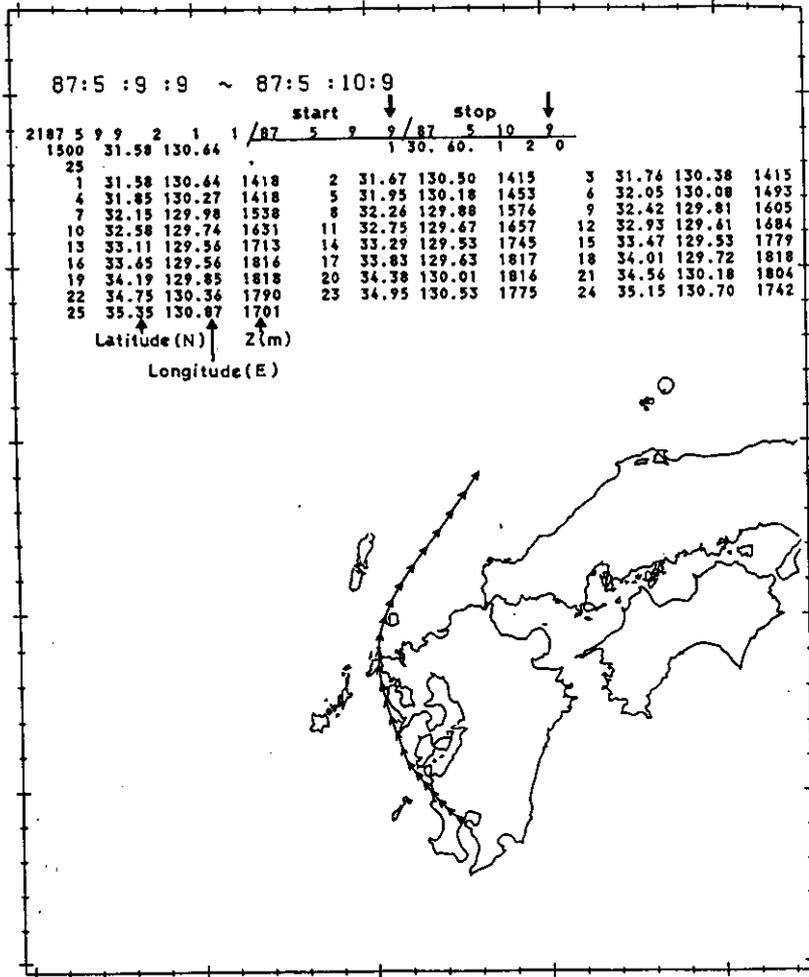


図16 1987年5月9日午前9時に桜島を出発した気流の等温位面流跡線  
 出発のときの高度は地上1,500mである。24時間にわたる流跡の緯度、経度  
 及び高度も図中に示した。

急激な比湿の減少が認められる。また800~850 mbにかけて沈降性の逆転層が出現しており800 mb面における温度上昇は1.1~1.4 K/dに達していた。このような高気圧下での沈降機構の重要性は成層圏O<sub>3</sub>の対流圏への沈降のメカニズムにおいても重要であることが指摘されている。

これら一連の観測、解析により九州北部地域における広域SO<sub>2</sub>汚染には桜島からのSO<sub>2</sub>が大きな影響を及ぼしていることが分かった。特に地上において高濃度が出現するメカニズムとしては移動性高気圧周縁もしくは後面での沈降性強安定層が鉛直拡散を抑制することと、下降気流による上空から地上へのSO<sub>2</sub>の輸送が重要であるとの結論が得られた。

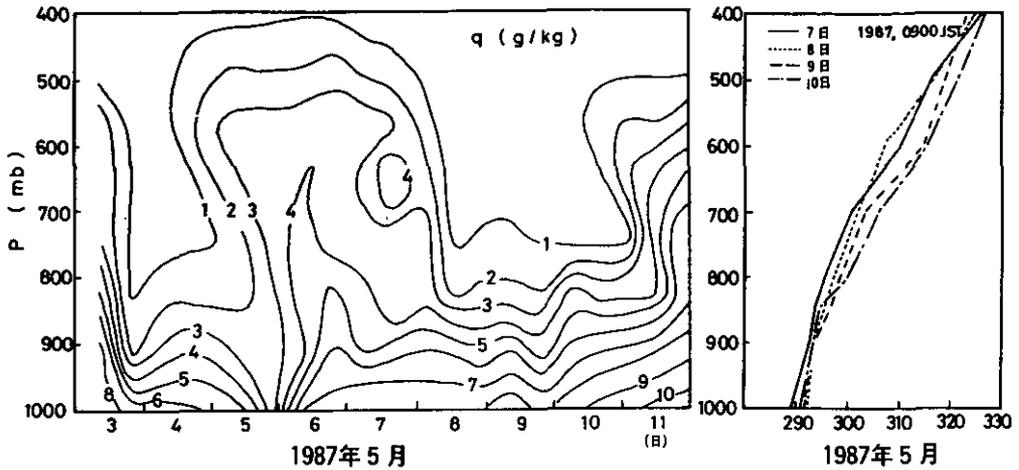


図17 1987年5月3～11日にかけての鹿児島における比湿（単位乾燥空気中に占める水分量， $q$ ; g/kg）の時刻高さ断面分布と5月7～10日にかけての温位（1,000mbに換算した気温， $\theta$ ; K）の垂直分布変化

### 2.2.3 海を渡る広域大気汚染

海上では大気境界層が発達せず上下方向の空気の混合が小さいため各層に放出された大気汚染物質は、気象条件によっては、高濃度のまま長距離を輸送されたり、長時間にわたって海上に滞留したりする可能性がある。特に九州北部海域においては九州の都市域や工業地域からの大気汚染物質、上空を輸送される火山からの排出物、成層圏から輸送される  $O_3$ 、大陸方面からの大気汚染物質等が複合的に影響を及ぼすことが推察される。このため海上及び島での観測を実施し、いくつかの重要な事実を認めた。

1987年5月7～14日にかけて九州北部地域の4地点において  $O_3$  の連続測定を行った。その結果を図18に示す。5月9日の午後に見島において90 ppb以上の  $O_3$  が観測された。14時20分に観測した上空300 mでの  $O_3$  の値も見島の南西海上で100 ppb以上の値を示した。5月8～12日間の炭化水素成分、アルデヒド類、カルボン酸類、有機性炭素、元素状炭素の観測結果を図19に示したが、いずれの濃度も5月9日に高い値となっていた。このことは日本海上に汚染物質が流出し光化学反応により  $O_3$  が生成したことを示すものである。

一方、5月8日には航空機により日本と韓国の国境線付近の海上で、エアロゾル物質等の垂直分布観測を行った。その結果の一部を図20に示す。上空1,000 mに  $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  の相対的な高濃度域があり、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  の垂直分布には良い相関関係が認められた。図21に示したように火山性ガスの場合には両者の間には相関は認められないため観測された汚染物質は人為起源のものである可能性が高い。ただし、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  ともに首都圏における光化学大気汚染気塊中の濃度と比べると  $1/3 \sim 1/4$  で、その比率も著しく異なっており  $SO_4^{2-}$  の割合が高いことが特

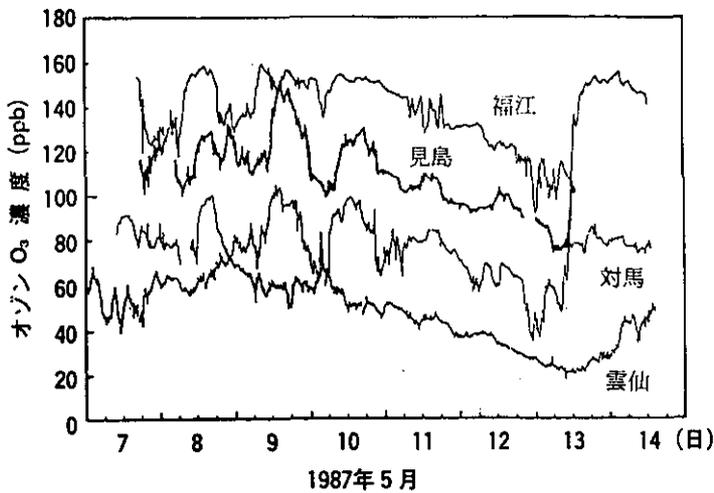


図18 1987年5月7～14日にかけての地上4地点でのO<sub>3</sub>濃度（UV法）の時刻変化  
 雲仙野岳のデータは実測値であるが、他の測定地点のデータは図を見やすくするために対馬は30ppb、見島は60ppb、福江は90ppbシフトして示した。

徴である。また1987年5月13日には正午から風が北風変わった直後に雲仙野岳を除く海上の測定点（見島、対馬、福江）でO<sub>3</sub>濃度が急上昇を示した。これらの観測結果は日本海上に大気汚染物質が滞留していることを示唆するものであり、九州地域における大気汚染の出現に重要な役割を果たしているものと思われる。

このように人為起源並びに自然起源により放出された汚染物質は環境大気中において光化学反応を起こしO<sub>3</sub>等の二次汚染物質を生成する。これらが気象条件によっては雲中に取り込まれ降水となって地上に達するため雲水中における各種物質の挙動の解明が極めて重要である。しかし雲の中での観測は困難である。1988年の観測においては初めての試みとして雲水中の過酸化水素濃度の測定を行った。過酸化水素は光化学反応により生成するが、ヘンリー定数が大きく、液層に溶解しやすい。この物質は亜硫酸イオンを硫酸イオンに酸化するため、酸性雨生成の指標的な化学種である。今回の観測においては、航空機にインパクター方式の雲水捕集器を積み込み、上空で雲水の捕集を行いフライト終了後、直ちに過酸化水素の測定を行った。捕集量は数ml～36mlであった。測定値は0.68～2.7μ/ml (ppm)であり、米国における測定値と同じレベルであった。この値は雲水中での硫酸イオン生成のシミュレーションにとって有用な値となるであろう。

#### 2.2.4 長距離輸送中のSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の生成

火山から排出されたSO<sub>2</sub>は長距離輸送中に硫酸塩(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)へと転換される。関東甲信地域における数値シミュレーション結果によれば、NO<sub>x</sub>の粒子状物質への平均変換速度が約15%/hで

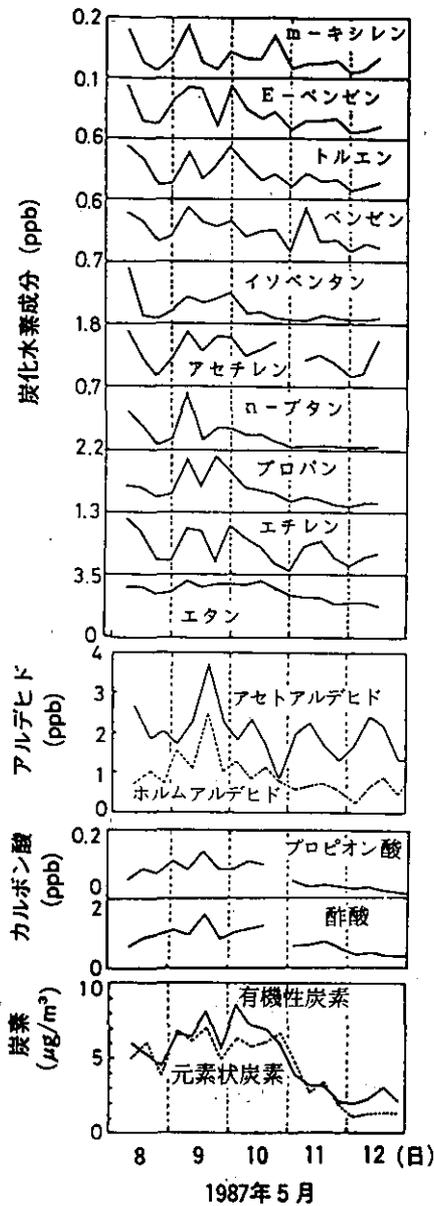


図19 1987年5月8～12日にかけての見島における炭化水素成分，アルデヒド類，カルボン酸類，有機性炭素(TOC)，元素状炭素(EC)の時刻変化

あるのに対し  $\text{SO}_2$  の酸化は約 4 %/h である。1 日を通しての空素系の収支として、排出された  $\text{NO}_x$  は種々の反応経路を経て、硝酸、硝酸塩、に転換され、1 日でその過半が地面に沈着するのに対して、硫黄系の収支はその 8 割が硫酸塩粒子の形で大気中に残留する。このため硫酸塩粒子は長距離輸送され、雨、霧などの湿性沈着により地上に達する。このような理由から長距離輸送

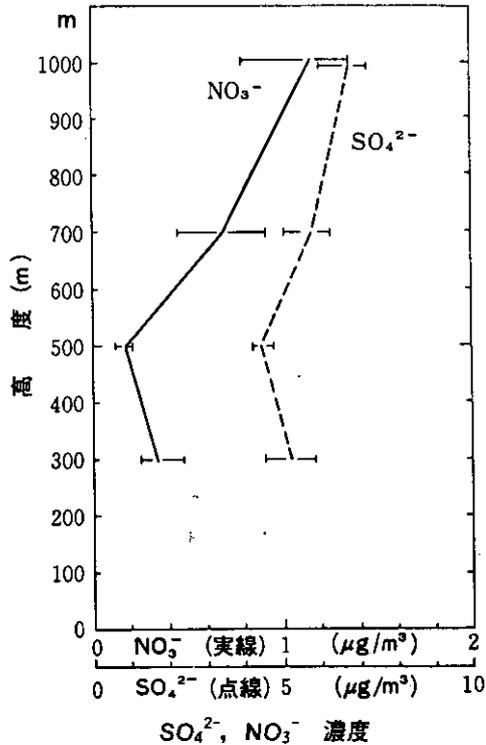


図20 1987年5月8日午前9時10分～11時30分の間日本と韓国の国境付近上空において観測されたNO<sub>3</sub><sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の平均値の垂直分布  
 図中の横線は観測濃度範囲を示す。

中の硫酸塩の生成速度をフィールド観測により明らかにすることは重要である。

桜島からの硫黄系化合物は排煙温度が850～900℃と高温なためほとんどがSO<sub>2</sub>の形で放出される。今回の航空機によるフィールド観測においても火山近傍のプルーム中においてはSO<sub>2</sub>のみが高濃度であり、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>はほとんど存在していなかった。もし硫黄系化合物の1日スケールでの沈着によるロス並びに輸送中における供給が無視できると仮定すれば、SO<sub>2</sub>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の時刻変化を知ることにより変換速度が推定できる。上述の仮定により火山煙流中のSO<sub>2</sub>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の間には以下の関係が成立する。

$$\frac{dSO_2}{dt} = \left( \frac{dSO_2}{dt} \right)_d + \left( \frac{dSO_2}{dt} \right)_r \quad (1)$$

$$\frac{d(SO_2 + SO_4^{2-})}{dt} = \left( \frac{d(SO_2 + SO_4^{2-})}{dt} \right)_d \quad (2)$$

$$\left( \frac{1}{SO_2} \frac{dSO_2}{dt} \right)_d = \left( \frac{1}{SO_2 + SO_4^{2-}} \frac{d(SO_2 + SO_4^{2-})}{dt} \right)_d \quad (3)$$

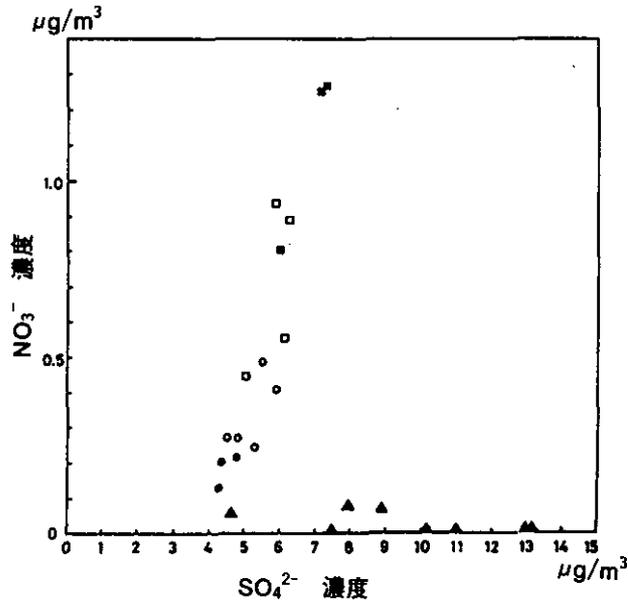


図21  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{SO}_4^{2-}$  の関係

図中の▲印は1987年5月9日の13時34分～15時56分にかけて海拔高度420～630mにおいて観測された火山からのブルーム中での値である。○印、●印、□印、■印はそれぞれ図20における300、500、700、1,000mでの観測結果に対応する。

ここでdは(dilution)拡散、希釈による濃度の時間変化であり、rは(reaction)反応による濃度の時間変化を表す。

もし、以下の(4)式が成立すると仮定すれば、

$$\left( \frac{d\text{SO}_2}{dt} \right)_r = -k\text{SO}_2 \quad (4)$$

(1)～(4)より $\text{SO}_2$ の $\text{SO}_4^{2-}$ への変換率kは(5)式で求められる。

$$k = \frac{d \left( \ln \frac{\text{SO}_2 + \text{SO}_4^{2-}}{\text{SO}_2} \right)}{dt} \quad (5)$$

1987年5月の観測における福江、長崎、対馬、見島での $\text{SO}_2$ と $\text{SO}_4^{2-}$ の6時間平均の濃度変化を図22に示した。また図23にはこの観測データと図16に示した流跡線計算の結果を用いて得られた総硫黄量に対する $\text{SO}_4^{2-}$ の硫黄量の割合を示した。その関係は直線的である。この値をもとにしてkを求めたところ約1.4%/hの値が得られた。この値は2.1.3で述べた関東甲信地域の夏季の数値シミュレーション結果の約1/2の値であった。変換速度はそのときのOHラジカ

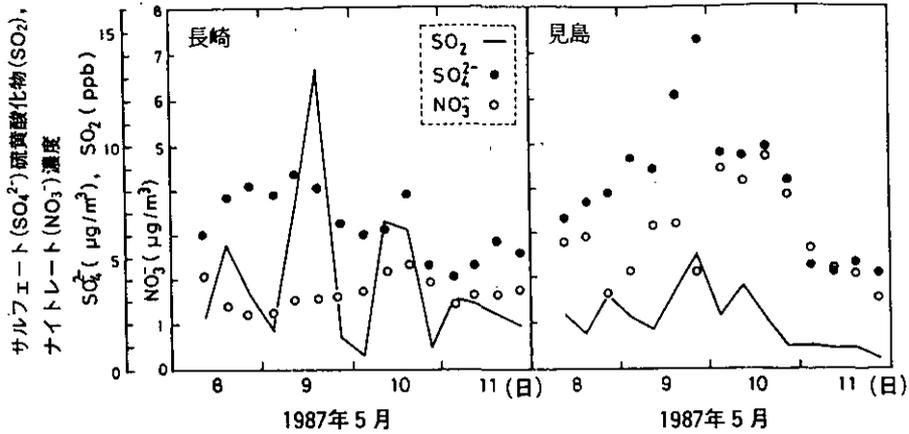


図22 1987年5月8～11日にかけての長崎市と見島におけるSO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度の時刻変化

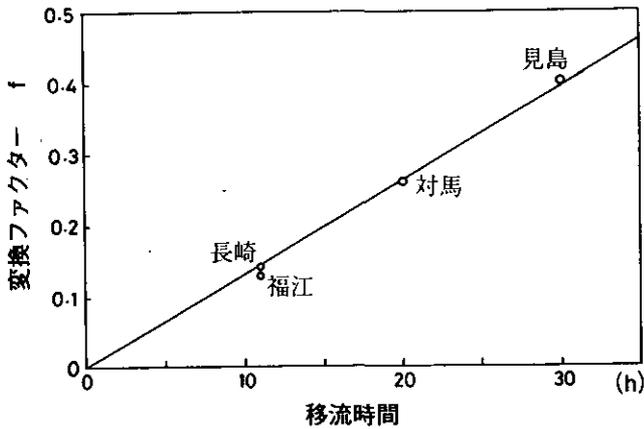


図23 火山からの煙の移流時間とサルフェートへの変換ファクター(f)の関係  
 $f (=SO_4^{2-}(S) / (SO_2(S) + SO_4^{2-}(S)))$  .

ル濃度や気象条件によって異なるが、オーダーとしては妥当な値である。フィールド観測から直接的に変換速度を求めた意義は大きい。

### 2.2.5 九州全域におけるエアロゾルの観測

1988年7月6～20日にわたり広域分布観測を実施し上空並びに地上でのガス、エアロゾルの分布を調査した。調査期間中の気象の概要は7～10日にわたり帯状の高気圧がやや南偏し晴で8日に上層を気圧の谷が通過し、11日からは太平洋高気圧の周辺部に当たり、大気が不安定となり、晴一時雨の天気は15日まで続いた。7月8～11日にかけての山口県、福岡県、長崎県(地

上観測)の $O_3$ 濃度は同様な変化を示しており、7月7～8日にかけて $O_3$ 濃度が上昇していた。図24(A)に福岡県太宰府市における地上での化学成分の経時変化を示す。浮遊粉じん濃度(光散乱Dust計)とエアロゾル各成分の相関は $SO_4^{2-}$ ( $r=0.965$ ),  $NH_4^+$ ( $r=0.976$ ),  $NO_3^-$ ( $r=0.815$ )との間で高く、これらの成分は浮遊粉じんの主な成分と考えられる。図24(B)に $SO_4^{2-}$ 濃度と $NO_3^-/SO_4^{2-}$ 濃度比を示す。特異的にDust濃度と $SO_4^{2-}$ 濃度が高い8日は、 $NO_3^-/SO_4^{2-}$ は小さい。飛行機観測においても $NO_3^-/SO_4^{2-}$ は $SO_4^{2-}$ 濃度の高い場合に小さくなっており、火山の影響が考えられる。7月10日の航空機観測結果によれば $O_3$ 濃度は全域にわたり20ppb以下であった。これは強い南西の風の影響によるものである。この値は夏季におけるこの地域のバックグラウンド濃度であると考えられる。一方、桜島からの噴煙についても観測を行った結果、長崎県の島原半島南海上約1,000mの高度で150ppb程度の $SO_2$ が認められた。(7月8日12時10分～20分)この時の $SO_4^{2-}$ 濃度は約 $20\mu g/m^3$ であり、高濃度を示した。これに対し

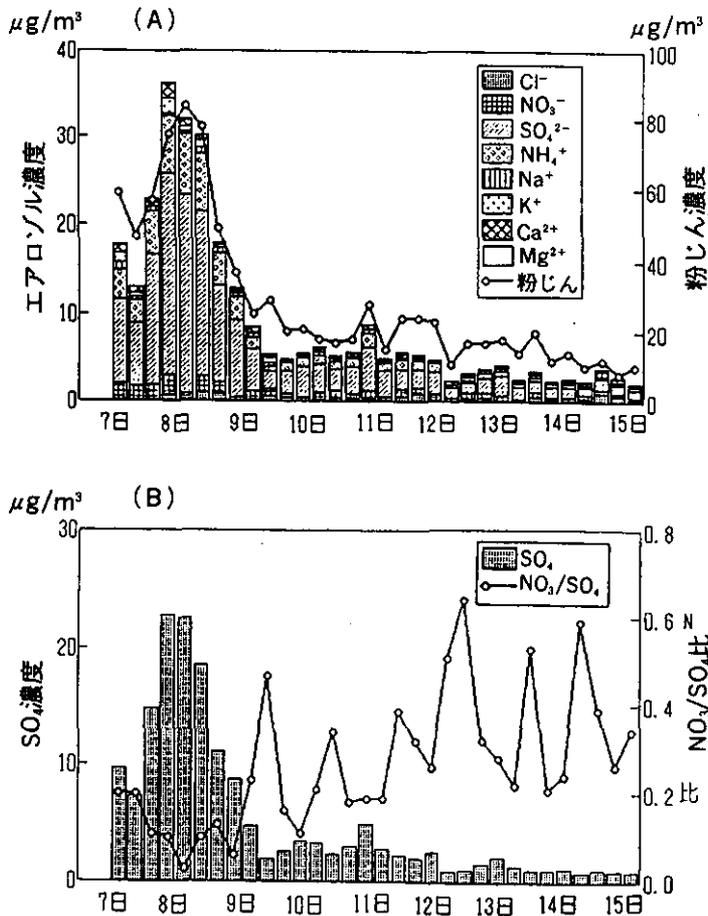


図24 1988年7月の太宰府市におけるエアロゾル成分及びガス成分の経時変化

桜島近傍ではSO<sub>2</sub>濃度は数100ppbとさらに高濃度であったが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は島原半島上空の1/10程度であった。

1989年の観測（6月5日～7月1日）においては九州地域の4地点においてエアロゾル中の元素成分の分布と濃度変動を求めた。サンプルの分析はPIXE（荷電粒子励起X線）法により行った。調査地点は福岡県太宰府市及び三郡山、長崎市、鹿児島県川内市である。サンプリング時間は3時間ないし6時間であった。図25に示したのは太宰府におけるAl、Si、S、Cl、K濃度の6月5～14日の3時間ごとの経時変化である。この中ではAl、Siが土壌起源であるため、非常に似た濃度変動を示した。元素成分間の相関については土壌起源といわれているAl、Si、K、Ca、Ti、Mn、Feが同様な濃度変動を示すため、相関係数が高かった。Sはどの成分とも高い相関は見られなかった。これは人為起源や自然起源である火山から放出されたSO<sub>2</sub>の反応生成物であるため、相関がなかったものと思われる。

図26には3地点におけるAlの濃度変動を示した。太宰府、長崎、川内とも非常に似た濃度変動を示していた。AlはMnとの相関が高かったが、川内においては、Mnと比較した場合に斜線の部分だけがAlの濃度が特に高かった。矢印で雨の降った日を示したが、雨が降ると大気中の濃度は低くなり、大気中から除去されることを示していた。Sに関しては図27に示したように濃度変動は他の成分に比べると小さかったが、1,500mの高度が南東の風である長崎の6月12～13日にはSの高濃度が観測された。この高濃度は他の2地点では顕著には現れていない。また1,500mの高度が南東の風であった6月21～23日においては、鹿児島ではSの高濃度が見られたが、長崎や太宰府では明らかではなかった。25～27日にかけては西の風が吹いているが、鹿児島や長崎、太宰府においてSの濃度が高かった。6月9日早朝の降雨前後の濃度変動を図25に示したが、Al、Si、S、3成分とも雨の時点で極端に濃度が低くなった。その後、降雨がやむとAl、Siの濃度は元の濃度レベルにならないのにS濃度はほぼ元の値に復帰していた。これはSがAl、Siと比較すると大気中から除去されにくいことを示していると思われる。

#### 2.2.6 上空並びに地上での雲水、雨水の観測

小型航空機にインパクター型の雲水サンプラーを設置し、雲水を捕集し、各種イオンとH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度を測定した。雲水の捕集が成功し、比較的多量に捕集された1988年7月11日の雲水（航空機）と、福岡県の三郡山（標高920m）で同日に捕集された雲水（三郡）測定結果との比較を述べる。雲水の測定結果は表2に示したが、雲水（航空機）の電気伝導度は最高が25μS/cmで、最低は5.0μS/cmであった。pHは4.53～5.30の間であった。7月11日は、九州地域の地上のサンプリングにおいても汚染物濃度は低く、雲水中における各種イオン濃度も低かった。雲水（三郡）は電気伝導度が数10μS/cm以上、pHは3.95～4.35、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は数μg/mlで比較的汚染された雲水であった。酸性雨生成機構解明を行うために、地上雨水（太宰府市）と近接する上空雨水（三郡山山頂）をほぼ同時に採取し、さらに雲水の採取も行い、両雨水の汚染物質の

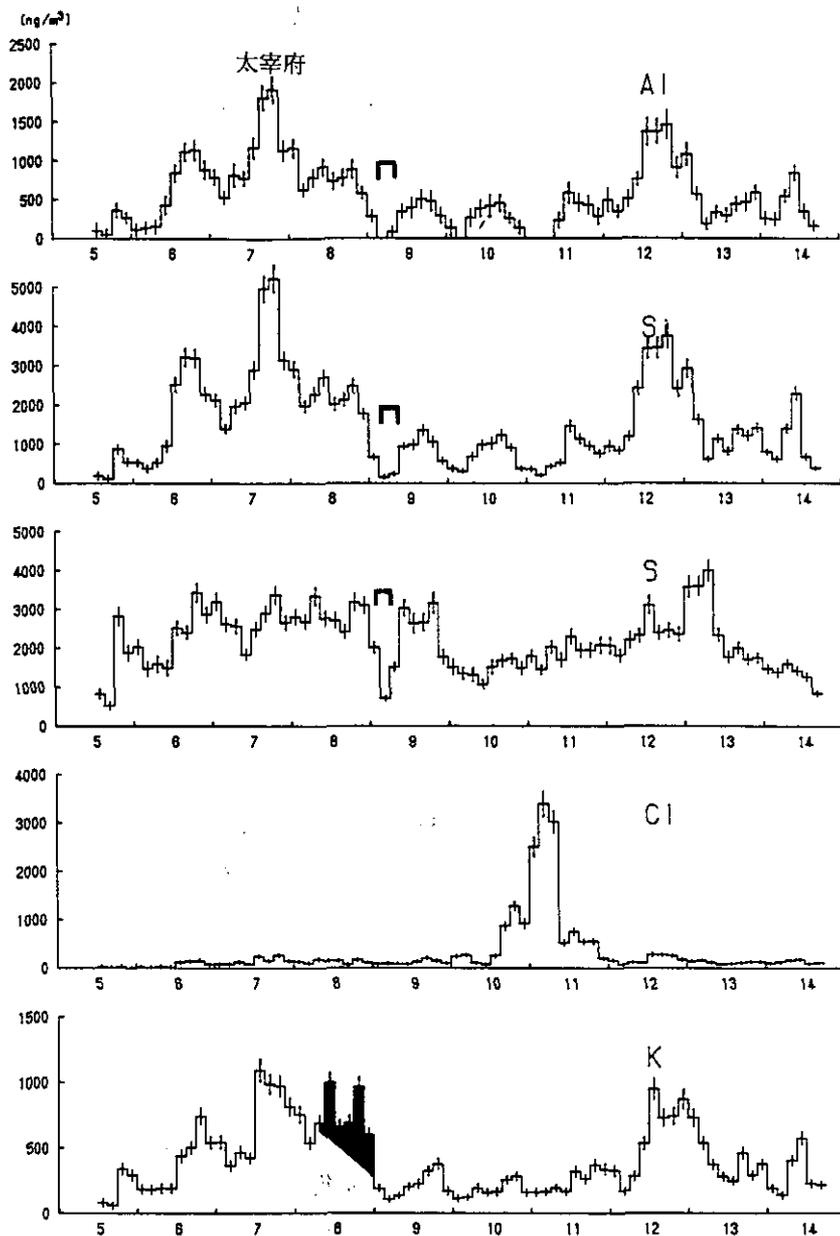


図25 1989年6月の太宰府における元素濃度の経時変化  
 図中の塗りつぶした部分は、Caと比較してKの濃度が特に高かった期間を示す。

取り込みの違いについて比較した。太宰府と三郡山の雨水及び雲水の平均pHを表3に示す。ほとんどの降雨で、地上雨水の方が上空雨水に比べ低くなっており、地上雨水は低いpHを持つ雲底部の雲水によりpHが下がったものと考えられる。図28に示す1時間ごとのpH変化から分か

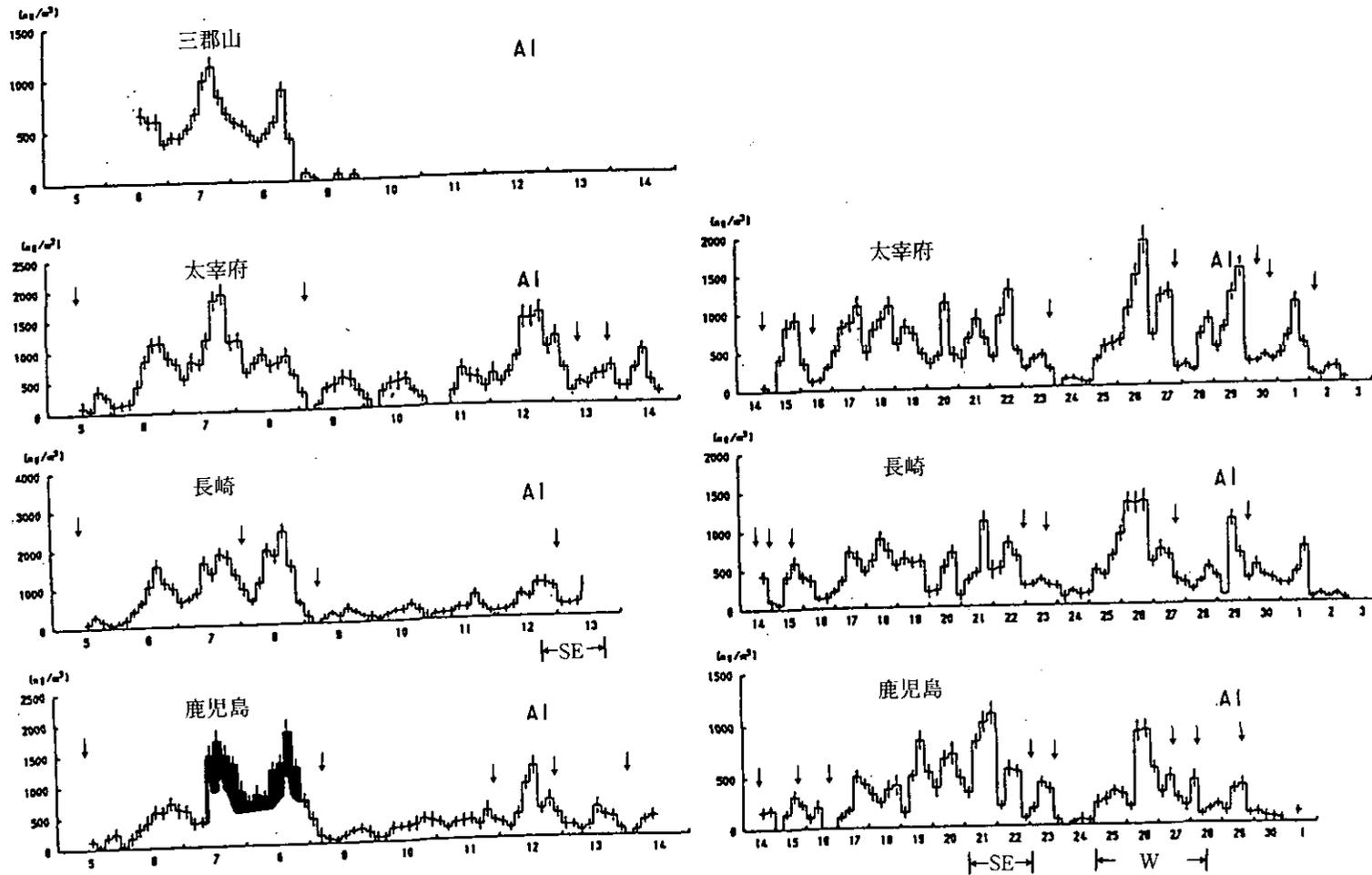


図26 1989年6月におけるAl濃度の経時変化  
 図中の塗りつぶした部分は、Mnと比較してAlの濃度が特に高かった期間を示す。

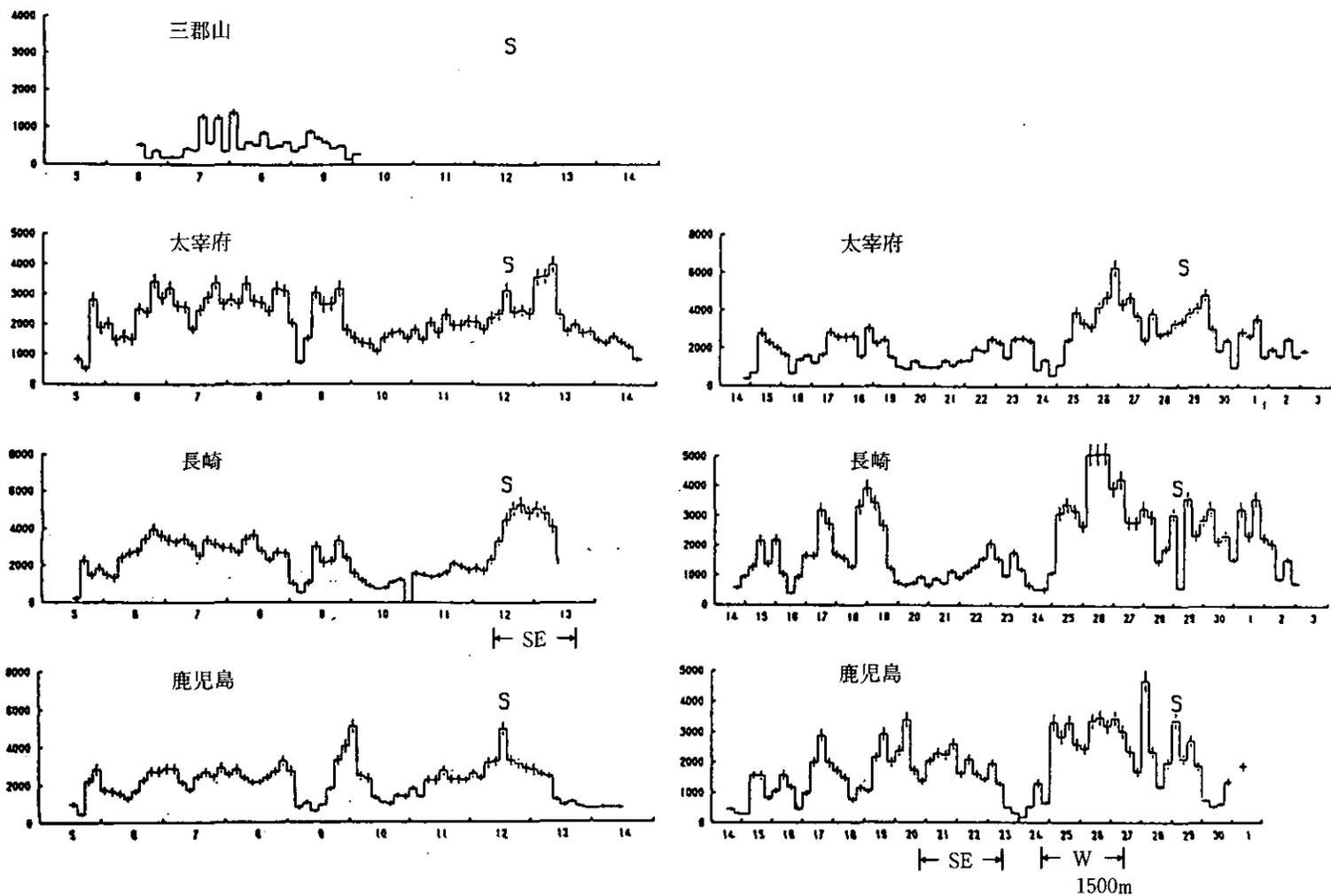


図27 1989年6月におけるS濃度の経時変化

表2 1988年7月11日における雲水(航空機)と雲水(三郡)のイオン種組成

	TIME	AMOUNT ml	E.C. $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\text{H}^+$ $\mu\text{g}/\text{ml}$	$\text{Cl}^-$ $\mu\text{g}/\text{ml}$	$\text{NO}_3^-$ $\mu\text{g}/\text{ml}$	$\text{SO}_4^{2-}$ $\mu\text{g}/\text{ml}$	$\text{NH}_4^+$ $\mu\text{g}/\text{ml}$	$\text{Na}^+$ $\mu\text{g}/\text{ml}$
雲水 (航空機)	9:15-9:55	17	25.0	4.53	0.0295	1.200	1.530	3.250	0.55	
	13:43-13:51	26	10.0	5.00	0.0100	0.780	0.520	0.800	0.09	0.53
	13:54-13:57	18	5.0	5.30	0.0050	0.200	0.190	0.280	0.04	0.12
	13:58-14:01	16	8.0	4.97	0.0107	0.470	0.290	0.530	0.07	0.12
	14:06-14:10	36	14.0	4.70	0.0200	0.410	0.380	1.050	0.09	0.43
雲水 (三郡)	12:25-12:55	150	45.0	4.35	0.0447	2.250	4.050	7.340	2.99	1.16
	13:25-13:55	115	59.0	4.15	0.0708	3.700	3.430	8.290	3.62	1.22
	14:15-14:45	45	91.0	3.95	0.1122	4.660	5.320	11.840	3.75	1.71

表3 1988年5月における降雨別の太宰府と三郡山の雨水及び雲水のpH

		5/10	5/11	5/14	5/20	7/11	7/12	7/13	7/15
pH	雨水 太宰府	4.35	3.88	3.88	4.88	4.65	5.02	5.08	4.81
	雨水 三郡山	4.35	4.43	4.22	5.56	4.75	5.55	5.02	5.81
	雲水 三郡山					4.15	5.65		

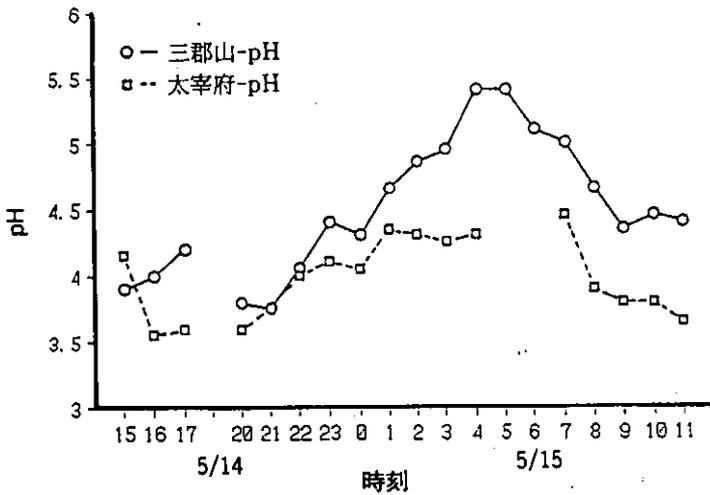


図28 1988年5月における雨水(5月14~15日)のpHの時刻変化

るように、地上雨水と上空雨水は類似した変動を示しており、pHは基本的には上空雨水によって決まる。5月の上空雨水の主な成分のpH別の濃度を図29に示す。上空雨水のpHにどの成分が関与しているかを見るために、水素イオン濃度と $([\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Ca}^{2+}])$ の関係を調べたところ、 $r = 0.77$  ( $y = 0.68x + 1.0$ )の高い相関関係が得られ、pHは $\text{SO}_4^{2-}$ と $\text{Ca}^{2+}$ に支配されることが

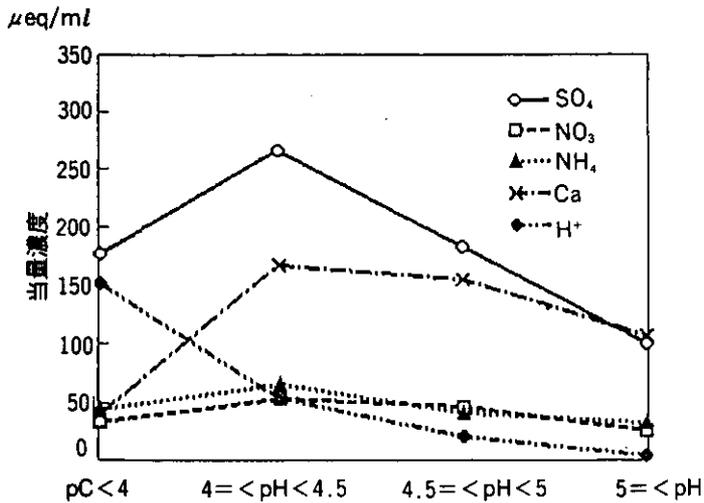


図29 1988年5月における三郡山で観測された上空雨水のpH別の各成分濃度

表4 1988年7月における雲水の過酸化水素濃度

	pH	EC μS/cm	SO <sub>4</sub> neq/ml	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> μg/ml
7/11	4.35	45	152.9	0.63
	4.15	59	172.7	0.85
	3.95	91	246.7	1.29
7/12	5.65	36	104.6	0.09
7/14	5.4	—	583.3	0.00

明らかとなった。1988年7月における雲水中のH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度を表4に示す。

### 2.2.7 九州全域における雨の分析

広島、山口を含む九州全域における雨水中の各種イオン成分の挙動と地域特性を明らかにするため、1988年7月6～19日に9県の協力のもとに一斉に雨水を採取し、各種イオン成分の分析を行った。採取した全試料のpHは3.55～7.00の範囲であった。降水量で重み付けしたpHの平均値は宮崎(4.11)広島(4.28)がやや低かったのに対し、佐賀(5.27)は高い値を示した。このうち、最もpHの低かった宮崎の試料は、図30に示すイオンの組成のとおり、低pHの原因がCl<sup>-</sup>であるという特異的な現象を示した。Cl<sup>-</sup>の供給源として桜島火山が考えられる。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の占める割合が10%以上を示したのは、広島(15.5%)、福岡(11.1%)、大分(10.3%)の3地点であり、九州全域でみればNO<sub>x</sub>に比較してSO<sub>x</sub>の寄与が大きいと考えられる。

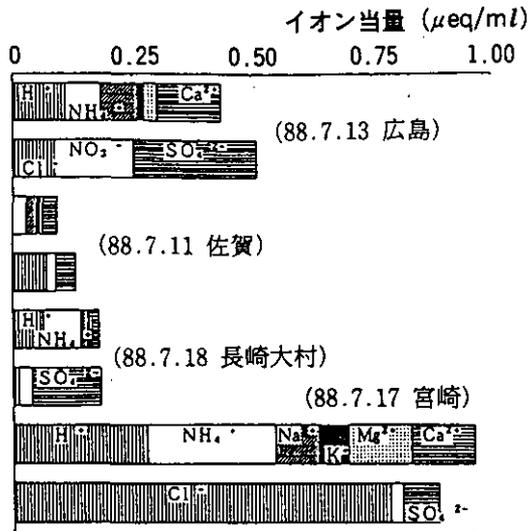


図30 1988年7月の広島、佐賀、長崎、宮崎における雨のイオン組成例

### 2.3 まとめと今後の研究課題

本特別研究で扱った大気汚染はすべて従来型大気汚染と酸性雨を含んでおり、これらの大気汚染については数値モデルは一応の完成をみた。そして、夏季については観測によりその妥当性を検証した。今後は次のような方向の研究が必要である。

#### (1) 都市規模、地域規模大気汚染と排出削減効果に関する研究

特に、環境基準の達成率の悪い $\text{NO}_2$ 汚染と、SPM汚染の機構解明、予測手法の確立が緊急を要する。これまでは主に暖候期の現象を扱った。しかし、 $\text{NO}_2$ 汚染と、SPM汚染が最悪になるのは寒候期であり、これについては上空を含めた観測は皆無に近い。したがって、今後冬季の大気汚染の大規模観測を実施して、動態を把握するとともに、数値モデルの確立を図る必要がある。この際、 $\text{NO}_2$ 汚染とSPMの二次粒子汚染は光化学反応の一環としてとらえる必要があり、今回開発した数値モデルの妥当性を冬季の光化学反応の観測結果を用いて検証する必要がある。SPM汚染の場合には、さらに自然起源も含めた一次排出粒子の発生源モデルの構築が必要である。SPMは大気中の滞留時間が数日～数週間に及ぶため、これまでよりはるかに広域、長時間にわたる数値シミュレーションを実施する必要がある。

#### (2) 酸性、酸化性物質の生成と環境に与えるインパクトに関する研究

大気汚染物質の長距離輸送を解明するに当たっては硫黄系の挙動が重要である。このためにはガス、エアロゾル、雲水、雨水を一連の現象として統一的に評価することが必要である。本特別

研究においては九州地域をフィールドとして、硫黄系の移流、拡散、変換、沈着の特徴を明らかにした。また硫黄系以外の海を渡る二次生成大気汚染の存在を示した。しかし特に海域におけるデータは限定されており、また雲中での挙動に関しては不明な点が多い。今後はこの研究を酸性、酸化性物質の生成と環境に及ぼすインパクトに関する研究へと発展させて行くことになろう。

# [資 料]

## I 研究の組織と研究課題の構成

### 1 研究の組織 (当時)

#### [A 研究担当者]

大気環境部 部長	秋元 肇
	大喜多敏一
大気環境計画研究室	植田洋匡・光本茂記・宮崎 武・花崎秀史・高薮 緑 若松伸司・鶴野伊津志
大気化学研究室	鷺田伸明・井上 元・酒巻史郎
エアロゾル研究室	福山 力・村野健太郎
大気物理研究室	竹内延夫・笹野泰弘・中根英昭
環境情報部	
情報調査室	松本幸雄
総合解析部 部長	内藤正明
計測技術部	
分析室	溝口次夫・刃刀正行・西川雅高
技 術 部	
理工施設管理室	竹下俊二・上原 清・水落元之

#### [B 客員研究員]

赤尾 秀雄	(長野県衛生公害研究所)	(昭和61年度)
浅井 富雄	(東京大学海洋研究所)	(昭和61~62年度,平成元年度)
有沢 雄三	(筑波大学)	(昭和61年度)
伊瀬 洋昭	(東京都環境科学研究所)	(昭和61年度)
植野 康成	(長崎県衛生公害研究所)	(昭和63年度)
内田 英夫	(長野県衛生公害研究所)	(平成元年度)
太田 幸雄	(北海道大学)	(昭和61年度)
大原真由美	(広島県環境センター)	(昭和61,63年度~平成元年度)
金安 公造	(北海道大学)	(昭和61~62年度)
北川 恵一	(豊橋技術科学大学)	(昭和62年度)
北田 敏廣	(豊橋技術科学大学)	(昭和61~62年度,平成元年度)
国戸 克彦	(豊橋技術科学大学)	(昭和61年度)
栗田 秀實	(長野県衛生公害研究所)	(昭和61年度~平成元年度)
黒田 忠弘	(豊橋技術科学大学)	(昭和62年度)

小森 悟	(九州大学)	(昭和61年度)
坂本 和彦	(埼玉大学)	(昭和61年度)
佐々木一敏	(長野県衛生公害研究所)	(平成元年度)
薩摩林 光	(長野県衛生公害研究所)	(昭和61年度～62年度)
鈴木 英治	(山口県衛生公害研究センター)	(昭和62年度)
鈴木健二郎	(京都大学)	(昭和61～62年度,平成元年度)
関口 恭司	(群馬県衛生公害研究所)	(昭和61年度,平成元年度)
早田 寿文	(山口県衛生公害研究センター)	(昭和62年度～平成元年度)
高橋 啓二	(千葉大学)	(昭和61～62年度,平成元年度)
立石ヒロ子	(長崎県衛生公害研究所)	(昭和61年度)
田中 正宣	(大阪市立環境科学研究所)	(平成元年度)
谷 一郎	(東京大学)	(昭和61～62年度)
梨本 真	((財)電力中央研究所)	(昭和61年度)
長瀬 洋一	(広島大学)	(昭和61～62年度)
中村 晃	(北海道大学)	(昭和61～62年度)
橋本 英典	(法政大学)	(昭和61～62年度)
広沢伊一郎	(長野県衛生公害研究所)	(昭和62年度)
福井 啓介	(姫路工業大学)	(昭和62年度,平成元年度)
福本 康秀	(名古屋大学)	(昭和63年度,平成元年度)
寶来 俊一	(鹿児島県環境センター)	(昭和62年度～平成元年度)
松本 光弘	(奈良県衛生研究所)	(昭和61年度)
右田 譲	(鹿児島県環境センター)	(平成元年度)
三沢 彰	(千葉大学)	(昭和61～62年度)
水島 二郎	(相模工業大学)	(昭和61～62年度)
埜村 守	(福井大学)	(昭和61～62年度)
柳川 民夫	(鹿児島県環境センター)	(昭和62～63年度)
山下 敬則	(長崎県衛生公害研究所)	(昭和63年度～平成元年度)
山田 茂	(長野県衛生公害研究所)	(昭和62年度)
山田 哲二	(ロスアラモス国立研究所)	(昭和61～62年度)
吉村賢一郎	(長崎県衛生公害研究所)	(昭和62年度)
黄 美元	(中国科学院)	(平成元年度)
エドガー・クノプロッホ	(カリフォルニア大学)	(昭和63年度)
G.R.カーマイケル	(アイオワ大学)	(昭和61年度～平成元年度)
R.A.ワデン	(イリノイ大学)	(昭和63年度)

[C 共同研究員]

有沢 雄三	(筑波大学)	(昭和61年度)
北川 恵一	(豊橋技術科学大学)	(昭和62年度)
国井 克彦	(豊橋技術科学大学)	(昭和61年度)
黒田 忠弘	(豊橋技術科学大学)	(昭和62年度)

2 研究課題と担当者 (\*客員研究員, \*\*共同研究員)

(1) 雲物理過程及び混合反応過程に関する研究

植田洋匡・村野健太郎・若松伸司・福山 力・鷺田伸明・井上 元・小森 悟\*

(2) 複雑地形上の大気現象に関する研究

光本茂記・植田洋匡・高藪 緑・鶴野伊津志・若松伸司・上原 清・栗田秀實\*

(3) 列島規模の大気汚染・気象の動態把握に関する研究

若松伸司・植田洋匡・鶴野伊津志・村野健太郎・酒巻史郎・水落元之・松本幸雄・  
竹内延夫・笹野泰弘・中根英昭・溝口次夫・西川雅高・功刀正行・内藤正明

(4) 風洞予測手法の開発に関する研究

上原 清・光本茂記・植田洋匡・竹下俊二・福井啓介\*

(5) 列島規模大気汚染の数値予測に関する研究

植田洋匡・若松伸司・鶴野伊津志・宮崎 武・花崎秀史・G.R.カーマイケル\*・R.A.ワデン\*  
北田敏廣\*・有沢雄三\*\*

## II 研究成果発表一覧

### 1 誌上発表

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
植田 洋匡	大気環境における伝熱問題	伝熱研究	25(97)	19-22	1986
薩摩林 光, 笹井 春雄, 栗田 秀實, 植田 洋匡	長距離輸送時における炭化水素成分の特徴とその光化学反応	大気汚染学会誌	21(3)	226-233	1986
高橋 啓二, 沖津 進, 植田 洋匡	関東地方におけるスギの衰退と酸性降下物による可能性	森林立地	XXVII (1)	11-17	1986
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸域から内陸域への大気汚染物質の長距離輸送—輸送, 変質過程—	文部省「環境科学」第1回環境科学シンポジウム講演報告集		40-43	1986
H.Kurita, H.Ueda	Meteorological conditions for longrange transport under light gradient winds	Atmos. Environ.	20	687-694	1986
H.Ueda, S.Komori, K.Fukui	A laboratory experment on lateral diffusion of scalar quantities in the stratified surface layer	Atmos. Environ.	20	757-762	1986
Y.S.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda,	An investigation of the formation of ambient NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> aerosol	Atmos. Environ.	20	1969-1977	1986
栗田 秀實, 植田 洋匡	佐久・上田・長野盆地における大気汚染	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	22-29	1986
Y. S. Chang, 栗田 秀實, 佐々木一敏, 植田 洋匡	汚染物質の気相—エアロゾル相間の平衡	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	160-167	1986
栗田 秀實, 植田 洋匡	長距離輸送時の気象の特徴と大気汚染物質の挙動	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	201-211	1986
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送過程	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	212-219	1986
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸地域から内陸地域への大気汚染物質の長距離輸送をもたらす総観規模の気象条件	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	220-227	1986
植田 洋匡, 光本 茂記, 栗田 秀實	ナイトスモッグ発生時の気流の特徴	文部省「環境科学」研究報告書	B-280- R11-2	50-254	1986

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
植田 洋匡	成層流, 流れの可視化ハンドブック	(朝倉書店)		29-32	1986
高橋 啓二, 沖津 進, 植田 洋匡	関東・甲信地方におけるスギの衰退と大気二次汚染物質の分布	98回日林論1987		177-180	1987
栗田 秀實, 植田 洋匡, 光本 茂記	弱い傾度風下での大気汚染の長距離輸送の気象学的構造	天気	35(1)	23-35	1987
薩摩林 光, 笹井 春雄, 栗田秀實, 植田洋匡	長野市における環境大気的光化学反応—炭化水素類の光化学反応性とアルデヒド硝酸の生成—	長野県衛生公害研究所研究報告	10	25-32	1987
薩摩林 光, 笹井 春雄, 栗田 秀實, 植田 洋匡	大気汚染物質長距離輸送時の低級脂肪酸の挙動	大気汚染学会誌	23(2)	15-122	1988
植田 洋匡	2章 移動現象, 2.2 乱流に関する基礎的事項2.3.1 重力場の流れ	化学工学便覧(化学工学協会編丸善, 1392P.)		112-120 129-131	1988
植田 洋匡	大気汚染長距離輸送時のエアロゾルの挙動	エアロゾル研究	3(3)	178-186	1988
植田 洋匡	大気汚染物質の大気中の移動と拡散	流れの可視化	8(29)	16-22	1988
植田 洋匡, 光本 茂記, 栗田 秀實	Flow mechanism for the long-range transport of air pollutants by the sea breeze causing inland nighttime high oxidants	J. Appl. Meteorol.	27	182-187	1988
小森 悟, 神崎 隆男, 村上 泰弘, 植田 洋匡	レーザ蛍光・散乱法による乱流場での二成分瞬間濃度の同時測定技術の開発	流れの計測	6(9)	24-30	1988
S.Komori, Y.Hiraga, Y.Murakami, H.Ueda	The generation of surface-renewal eddies in an open-channel flow	Transp. Phenom. in Turbul. Flows Theory, Exp. & Numer. Simulation		213-223	1989
H.Ueda, S.Komori, K.Fukui	The generation of surface-renewal eddies in an open-channel flow	Transp. Phenom. in Turbul. Flows Theory, Exp. & Numer. Simulation.		325-333	1989

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
薩摩 林光, 栗田 秀實, 水庫 英喜, 横内 陽子, 植田 洋匡	大気汚染物質長距離輸送時の ジカルボン酸の挙動	大気汚染学会誌	24	264-269	1989
H.Ueda, Y.S.Chang, G.R.Carmichael	The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan	Proc. 9th US Jpn. Conf. Photochem. Air Pollut.		58-114	1988
Y.S.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda	The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan	Atmos. Environ.	23(2)	363-394	1989
S.Komori, Y.Murakami, H.Ueda	Detection of coherent struc- tures associated with bur- sting events in an open- channel flow by a two- point measuring technique using two laser-doppler velocimeters	Phys. Fluids A-Fluid Dynamics-	1(2)	339-348	1989
S.Komori, T.Kanzaki, Y.Murakami, H.Ueda	Simultaneous measurements of instantaneous concentra- tions of two species being mixed in a turbulent flow by using a combine laser- induced fluorescence and laser-scattering technique	Phys. Fluids A-Fluid Dynamics-	1(2)	349-352	1989
植田 洋匡	乱流研究この20年, 研究者達 の若き日の思い出(上巻)	(河上記念財団, 563p)		458-461	1989
T.Kitada, H.Ueda	Pollutant dispersion and land/sea breeze circula- tions	Encycl. of Environ. Control Technol.	2	583-630	1989
H.Ueda, T.Kuroda, T.Kitada, G.R.Carmichael	Nitrogen-dioxide pollution in the winter urban area and emission reduction strategy against it - Numerical ex- periment -	Man & His Ecosy- stem	3	395-400	1989
植田 洋匡	大気の変化と酸性雨	科学	59	610-619	1989
植田 洋匡	酸性雨のシミュレーション	シミュレーション	8(3)	.20-26	1989
Y.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda	The transport and formation of sulfates and nitrates in central Japan	Atmos. Environ.	23	1749-1773	1989

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
Y.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, T.Kitada, H.Ueda	The long range transport of photochemical oxidants and acidic species in central Japan	Man & his Ecos Atmos	3	401-406	1989
S.Komori, Y.Murakami, H.Ueda	The relationship between surface renewal and bursting motions in an open-channel flow	J.Fluid Mech.	203	103-123	1989
植田 洋匡	浮遊粒子状物質中の二次粒子の生成と大気中での挙動	公害と対策	26(2)	49-54	1990
北田 敏廣, 北川 恵一, P.C.S.Lee, 黒田 忠弘, 植田 洋匡	日本周辺地域への適用を考慮した多国籍酸性雨輸送の総合モデル	「人間環境系」研究報告集		35-37	1990
H.Satsumabayashi, H.Kurita, Y.Yokouchi, H.Ueda	Mono-and di-carboxylic acids under long-range transport of air pollution in central Japan	Tellus	41B	219-229	1989
R.A.Wadden, I.Uno, S.Wakamatsu	Source discrimination of short-term hydrocarbon samples measured aloft	Environ. Sci. Technol.	20	473-483	1986
鶴野伊津志	I. 都市スケールにおける拡散現象の研究 I-3 都市域の気象特性	文部省「環境科学」研究報告書「都市域大気中の高濃度汚染及ばす拡散のメカニズムに関する研究」最終報告書	B-296-R-15-1	27-64	1986
鶴野伊津志, 若松 伸司	I. 都市スケールにおける拡散現象の研究 I-4.3 都市域での汚染質の垂直拡散機構	文部省「環境科学」研究報告書「都市域大気中の高濃度汚染及ばす拡散のメカニズムに関する研究」最終報告書	B-296-R-15-1	78-86	1986
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司, 中村 晃	乱流モデルによる夜間都市境界層の形成機構の検討	衛生工学研究論文集	24	125-137	1987
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	夜間の都市域におけるNO <sub>2</sub> の高濃度発現メカニズム	大気汚染学会誌	24	130-143	1989

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
T.Ohara, I.Uno, S.Wakamatsu	Observed structure of a land breeze head in the Tokyo metropolitan area	J. Appl. Meteorol.	28	693-704	1989
I.Uno, H.Ueda, S.Wakamatsu	Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer	Boundary-Layer Meteorol.	49(1-2)	77-98	1989
大原 利眞, 鶴野伊津志, 若松 伸司	陸風前線通過に伴うNO <sub>x</sub> 高濃度汚染現象の観測	大気汚染学会誌	25(1)	66-76	1990
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	夜間の都市境界層と大気汚染質の動態	大気汚染学会誌	23(2)	103-114	1988
I.Uno, S.Wakamatsu, H.Ueda, A.Nakamura	An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer	Boundary-Layer Meteorol.	45	59-82	1988
光本 茂記, 植田 洋匡, 栗田 秀實	大規模海風の関東山地越え(その2)	文部省「環境科学」研究報告書	B-280-R11-2	65-71	1986
栗田 秀實, 内田 英夫, 光本 茂記, 植田 洋匡, 溝口 次夫	乗鞍岳山頂におけるバックグラウンドオゾン濃度	長野県衛生公害研究所研究報告	9	25-28	1986
村野健太郎	イオンクロマトグラフ法による大気試料の分析	環境技術	15(7)	1-6	1986
及川紀久雄, 村野健太郎	イオンクロマトグラフィー	現代化学	184	16-23	1986
佐々木一敏, 栗田 秀實, 村野健太郎, 水落 元之, 植田 洋匡	大気汚染物質の長距離輸送時における硫酸塩硝酸塩等の挙動	大気汚染学会誌	21(3)	216-225	1986
村野健太郎, 水落 元之, 尾崎 裕, 泉 克幸, 福山 力, 植田 洋匡, 大喜多敏一, 寺田 信之, 佐々木一敏, 栗田 秀實	軽井沢で観測された放射霧と雨の化学組成	文部省「環境科学」研究報告書「内陸域における大気汚染の動態」	B-280-R11-2	180-184	1986
松本 光弘, 西川 喜孝, 村野健太郎, 福山 力	高速液体クロマトグラフィーによる雨水中のアルデヒドの定量	分析化学	36(3)	179-183	1987
村野健太郎	大気中の過酸化水素の測定	ぶんせき	(9)	88-90	1987
村野健太郎	硝酸・硝酸塩	気象研究ノート	(158)	75-84	1987

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
村野健太郎	大気汚染の現状と問題点—酸性雨—	SUT BULLETIN (東京理科大学出版)	9月号	57-61	1987
村野健太郎	Ⅵ 液相化学	文部省「環境科学」研究報告集	B316	64-77	1987
K.Murano	Air pollution : Aerosol chemical analysis	System & Control Encyclopedia (Pergamon Press)		174-177	1987
村野健太郎	イオンクロマトグラフィーの基礎	イオンクロマトグラフィー (共立出版, 246p)		34-48	1988
村野健太郎	酸性霧をとらえる	自然保護	322	8-9	1989
村野健太郎	酸性霧	公害と対策	25(7)	77-83	1989
村野健太郎	大気中の過酸化水素—酸性雨への寄与と測定	公害と対策	25	1098-1104	1989
Y.Ikeda, K.Murano, K.Sekiguchi	An estimation of chemical species in fog on Mt. Akagi by a mathematical model	Environ. Technol. Lett.	10	929-939	1989
村野健太郎	酸性霧の発生が問題化大気汚染との因果関係は	地上	(2)	108-109	1990
村野健太郎	酸性雨の現状	プロシユーム	(8)	6	1990
村野健太郎	温室効果ガス「メタン」の増加—水田からの発生量の測定—	公害と対策	26(3)	17-23	1990
若松 伸司, 鶴野伊津志, 中村 晃	I. 都市スケールにおける拡散現象の研究 I—2 フィールド観測の概要	文部省「環境科学」研究報告書「都市域大気中の高濃度汚染に及ぼす拡散のメカニズムに関する研究」最終報告書	B-296-R15-1	27-64	1986
若松 伸司, 鶴野伊津志	I. 都市スケールにおける拡散現象の研究 I—4.1 都市域における大気汚染濃度の動態	文部省「環境科学」研究報告書「都市域大気中の高濃度汚染に及ぼす拡散のメカニズムに関する研究」最終報告書	B-296-R15-1	65-70	1986

発 表 者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊 年
若松 伸司, 鶴野伊津志	I. 都市スケールにおける拡散現象の研究 I-4.4 トレーサー実験による都市域の拡散現象	文部省「環境科学」研究報告書「都市域大気中の高濃度汚染に及ぼす拡散のメカニズムに関する研究」最終報告書	B-296-R15-1	87-97	1986
S.Wakamatsu, I.Uno, K.L.Schere	Application of a three-dimensional photochemical smog formation model to the Tokyo metropolitan area	Air Pollut. Modeling & Its Appl.(Plenum, 702p.)	VI	259-270	1988
S.Wakamatsu, I.Uno, H.Ueda, K.Uehara, H.Tateishi	Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere	Atmos. Environ.	23	1815-1826	1899
若松 伸司	広域大気汚染研究の現況と将来	瀬戸内海科学	1(2)	74-80	1989
若松 伸司, 鶴野伊津志, 須山 芳明, 阿相 敏明, 牧野 宏	飛行船を利用した大気汚染物質分布の観測	大気汚染学会誌	25(1)	97-101	1990

## 2 口頭発表

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	刊年
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送及び変質過程	日本気象学会1986年 春季大会	東京	61.5
H.Ueda, S.Komori, T.Kitada	Transport phenomena in the thermal internal boundary layer	World Congr. III Chem. Eng.	Tokyo	61.9
植田 洋匡, 光本 茂記, 栗田 秀實	夜間高濃度オキシダント汚染を引き起 こす大気汚染長距離輸送の流動機構 —重力流—	文部省「環境科学」 第1回環境科学シン ポジウム	東京	61.11
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸域から内陸域への大気汚染物質の 長距離輸送—輸送, 変質過程—	文部省「環境科学」 第1回環境科学シン ポジウム	東京	61.11
植田 洋匡, 小森 悟, 福井 啓介	不安定成層乱流中の大規模渦の構造	第27回大気汚染学会	京都	61.11
植田 洋匡, 光本 茂記, 栗田 秀實, 薩摩林 光	重力流による大気汚染物質の長距離輸 送	第27回大気汚染学会	京都	61.11
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸域から内陸域への大気汚染物質の 長距離輸送—流跡線上での汚染物質 の変質過程—	第27回大気汚染学会	京都	61.11
栗田 秀實, 植田 洋匡	沿岸域から内陸域への大気汚染物質の 長距離輸送—オゾン濃度と気温の立 体分布—	第27回大気汚染学会	京都	61.11
薩摩林 光, 笹井 春雄, 栗田 秀實, 植田 洋匡	環境大気的光化学反応性	第27回大気汚染学会	京都	61.11
筑紫 文夫, 私市 和俊, 安達 隆史, 植田 洋匡, 小森 悟	NOとO <sub>3</sub> の大気拡散と反応に関する 物理モデル	第27回大気汚染学会	京都	61.11
H.Ueda	Turbulence observations from a tethered balloon system in brush creek	ASCOT Symp.	Los Alamos (USA)	62.3
Y.S.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda	The production and transport of ox- idants during long range transport	1st Am. Symp. Photochem. Oxidants	Quebec (USA)	62.2
S.Komori, H.Ueda, R.Sawano	Coherent structures associated with bursting events in the wall region of open-channel flow	World Congr. III Chem. Eng.	Tokyo	61.9

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	刊 年
植田 洋匡, 小森 悟, 福井 啓介	不安定成層乱流境界層流中の大規模渦構造	化学工学協会第52年会	名古屋	62.4
植田 洋匡, 栗田 秀實	沿岸から山岳地域内部への大気汚染長距離輸送の機構	化学工学協会第52年会	名古屋	62.4
栗田 秀實, 植田 洋匡	海風時の重力流ヘッドの進行に伴う汚染気塊の輸送	日本気象学会1987年春季大会	筑 波	62.5
栗田 秀實, 植田 洋匡, 光本 茂記	弱い傾度風下で大気汚染物質を輸送する大規模な局地風系の形成過程	日本気象学会1987年春季大会	筑 波	62.5
有沢 雄三, 河村 武, 植田 洋匡	海陸風と山谷風の形成機構の類似性—2次元数値実験—	日本気象学会1987年春季大会	筑 波	62.5
薩摩林 光, 笹井 春雄, 植田 洋匡	大気汚染物質長距離輸送時の低級モノカルボン酸の挙動	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
栗田 秀實, 植田 洋匡	海風(重力流)による汚染気塊の輸送及びそのヘッド付近における挙動	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
植田 洋匡, 光本 茂記, 栗田 秀實, 有沢 雄三, 河村 武	弱い傾度風下で長距離輸送をもたらす大規模風の機構—数値実験—	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
北田 敏廣, 植田 洋匡, 栗田 秀實	唯水峠上の三次元流れ場の時間変化と大気汚染の長距離輸送	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
小森 悟, 神崎 隆男, 村上 泰弘, 植田 洋匡	二成分混合と二次反応を伴う乱流場での濃度変動積の理論的・実験的評価法について	化学工学協会鹿児島大会	鹿児島	62.11
植田 洋匡, 有沢 雄三	台地—平地風と海陸風の相似性	化学工学協会鹿児島大会	鹿児島	62.11
栗田 秀實, 植田 洋匡, 光本 茂記	沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染の長距離輸送の気象学的構造	環境科学シンポジウム1987	東 京	62.11
北田 敏廣, 水谷 隆一, 植田 洋匡, 栗田 秀實	唯水峠上の三次元流れ場と大気汚染輸送の特性	環境科学シンポジウム1987	東 京	62.11
栗田 秀實, 内田 英夫, 広沢伊一郎, 植田 洋匡	中部山岳地域における大気汚染による視程の悪化	1988年日本気象学会春季大会	柏	63.5
小森 悟, 神崎 隆男, 村上 泰弘, 植田 洋匡	レーザー蛍光・散乱法による乱流場での二成分濃度の同時測定	日本伝熱シンポジウム	金 沢	63.6

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
吉山 秀典, 田森 行男, 植田 洋匡	加熱方式によるミストの粒径分布測定	第6回エアロゾル科学・技術研究討論会	大 阪	63. 8
平賀 義之, 小森 悟, 村上 泰弘, 植田 洋匡	ガス吸収速度に及ぼす自由表面近傍の大スケール渦の効果	化学工学協会第21回秋季大会	福 岡	63.10
植田 洋匡, Y.S.Chang, G.R.Carmichael	大気汚染長距離輸送中の硫酸塩, 硝酸塩の生成と輸送一数値予測一	化学工学協会第21回秋季大会	福 岡	63.10
植田 洋匡, Y.S.Chang, G.R.Carmichael	長距離輸送される光化学大気汚染の排出削減効果	化学工学協会第21回秋季大会	福 岡	63.10
Y.S.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda	Acid formation and deposition in central Japan	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
Y.S.Chang, G.R.Carmichael, H.Kurita, H.Ueda	The transport, formation, and deposition of photochemical oxidants and secondary pollutants in central Japan	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
H.Kurita, H.Ueda, S.Mitsumoto	Combination of local winds under light gradient wind conditions and long-range transport of air pollution	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
T.Kitada, R.Mizutani, K.Kunii, H.Ueda, K.Kurita	Vortex induced by an extended sea breeze over a ridge region in mountainous central Japan - Its implication in long range transport of air pollution -	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
H.Ueda, S.Mitsumoto, H.Kurita, Y.Arisawa, T.Kawamura	Formation of a large-scale wind system as a combination of local winds under light gradient wind conditions - Numerical experiment -	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
横内 陽子, 薩摩林 光, 植田 洋匡, 安部 喜也	環境大気及び降水中に存在するモノテルペン-オゾン反応生成物の測定	日本化学会第58春季年会	京 都	1. 4
植田 洋匡	大気汚染質の拡散と気象	昭和63年度気象環境研究会	つくば	1. 3
植田 洋匡, 鶴野伊津志, 北田 敏廣	都市域二酸化窒素の挙動	化学工学協会第54年会	神 戸	1. 4
神崎 隆男, 中島 昭浩, 小森 悟, 村上 泰弘, 植田 洋匡	反応乱流のストキャスティックモデル	化学工学協会第54年会	神 戸	1. 4

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	刊 年
植田 洋匡	大気汚染長距離輸送時のエアロゾルの挙動	大気汚染研究協会関東支部粒子	東 京	1.4
余 偉明, 植田 洋匡, 河村 武	$k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた海陸風の重力流の数値実験	日本気象学会1989年会春季大会	東 京	1.5
小森 悟, 平賀 義之, 村上 泰弘, 植田 洋匡	気・液界面での液側乱流構造とスカラー輸送機構	第26回日本伝熱シンポジウム	仙 台	1.5
余 偉明, 植田 洋匡	大気中の重力流の挙動	第26回日本伝熱シンポジウム	仙 台	1.5
北田 敏廣, 北川 恵一, P.C.S.Lee, 植田 洋匡	酸性雨研究のための Diagnostic な雲物理モデルの LOD-FEM コードによる実行	土木学会第44年次学術講演会	名古屋	1.10
宇都宮 彬, 岩本 真二, 大石 興弘, 下原 孝章, 浜村 研吾, 石橋 龍吾, 植田 洋匡, 若松 伸司, 村野健太郎	九州地域における大気汚染観測(4) —福岡県におけるエアロゾル, ガス成分濃度調査について—	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
早田 寿文, 鈴木 英治, 植田 洋匡, 若松 伸司, 酒巻 史郎	九州地域における大気汚染観測(5) —山口県における調査結果—	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
北田 敏廣, 北川 恵一, P.C.S.Lee, 植田 洋匡	酸性雨研究のための Diagnostic な雲物理モデルの LOD-FEM コードによる実行	環境科学会1989年会	東 京	1.11
植田 洋匡	雲物理過程を伴う列島規模大気汚染に関する研究	第16回環境保全・公害防止研究発表会	東 京	1.12
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡, 高橋 春, 中村 晃	夜間の都市境界層の形成機構について	日本気象学会1986年春季大会	東 京	61.5
I.Uno, S.Wakamasu, H.Ueda	Observational study of the nocturnal urban boundary layer	7th World Clean Air Congr.	Sidney (Aust.)	61.8
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡, 中村 晃	夜間の都市境界層の乱流構造	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
中村 晃, 鶴野伊津志, 若松 伸司	都市域における大気汚染物質の水平分布	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
大原 利真, 鶴野伊津志, 若松 伸司	東京都心部における冬期夜間の乱流と汚染濃度の鉛直分布	第27回大気汚染学会	京 都	61.11

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡, 中村 晃, 大原 利真	都市域における気象特性と拡散(1)	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	$k-\epsilon$ 乱流モデル Closure Model による大気境界層の内部構造の検討 —中立及び安定成層—	日本気象学会1987年 会春季大会	筑 波	62. 5
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司, 大原 利真	夜間の都市境界層の観測とモデリング	第15回環境問題シン ポジウム	東 京	62. 8
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡	都市キャノピー層を考慮した都市境界 層乱流モデル	土木学会第42回年次 学術講演会	札 幌	62. 9
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡	乱流モデルによる都市境界層のシミュ レーション(1)	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
鶴野伊津志, 若松 伸司, 植田 洋匡	乱流モデルによる都市境界層のシミュ レーション(2)	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
大原 利真, 鶴野伊津志, 若松 伸司	陸風前線通過に伴う NO <sub>x</sub> 高濃度汚染 現象の解析	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	夜間の都市境界層中での大気汚染質の 拡散機構	環境科学シンポジウ ム1987	東 京	62.11
大原 利真, 鶴野伊津志, 若松 伸司	陸風前線通過時の乱流構造の変化につ いて	1988年日本気象学会 春季大会	柏	63. 5
I.Uno, H.Ueda	Some contributions to the algebraic stress turbulence model for the ap- plication of stratified flows	Int. Assoc. Hydraul. Res.	Tokyo	63. 7
I.Uno, H.Ueda, S.Waka- matsu	Numerical simulation of nocturnal urban boundary layer and behavior of reactive pollutants	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
T.Ohara, I.Uno, S.Wakamatsu	Penetration of land breeze front and accompanied high concentration of air pollutants observed in the Tokyo metropolitan area	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	夜間の都市域における NO <sub>2</sub> の高濃度 発現メカニズム	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
鶴野伊津志, 植田 洋匡, 若松 伸司	夜間の都市域の高濃度 NO <sub>2</sub> 汚染につ いて	第25回衛生工学研究 討論会	東 京	1. 1

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
大原 利真, 神成 陽容, 鶴野伊津志, 若松 伸司	陸風前線通過に伴うNO <sub>x</sub> 高濃度汚染現象の統計的解析	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
鶴野伊津志, 若松 伸司	大気汚染質濃度の鉛直プロファイル —東京大学駒場キャンパスでの観測結果—	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
I.Uno	Evolution and structure of convective mixed layer in the urban center	IFHP/CIB/WOM/IG U Int. Conf. Urban Clim., Plann. & Build.	Kyoto	1.11
大原 利真, 鶴野伊津志, 若松 伸司	都市域におけるNO <sub>x</sub> 高濃度汚染現象の解析—陸風前線の構造とその通過時の汚染のメカニズムについて—	第26回衛生工学研究 討論会	福 岡	2.1
薩摩林 光, 笹井 春雄, 栗田 秀實, 横内 陽子, 水落 元之, 植田 洋匡	長距離輸送時における炭化水素類の光化学反応性とその二次汚染物の生成	環境科学シンポジウム1987	東 京	62.11
H.Satsumabayashi, H.Kurita, Y.Yokouchi, M.Mizuochi, H.Ueda	Behavior of mono- and dicarboxylic acids in long-range transport of air pollutants	6th Int. Symp. CACGP Global Atmos. Chem.	Peter- borough (Canada)	62.8
松本 幸雄, 廣崎 昭太, 新藤 純子, 間島 政紀, 渡辺加代子	光化学オキシダントの広域移流現象における統計モデル	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
松本 幸雄, 横田 達也, 海野 純一, 渡辺加代子, 山本 啓子	酸性雨情報解析システムの試作 —検索・表示機能を中心として—	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
光本 茂記, 植田 洋匡, 栗田 秀實, 薩摩林 光	沿岸域から内陸地域にかけての汚染物質輸送過程—海風前線の進行と汚染物質濃度分布の変化—	日本気象学会1986年 春季大会	東 京	61.5
光本 茂記, 溝口 次夫, 栗田 秀實, 内田 英夫	八方尾根(白馬岳)におけるオゾン濃度の連続測定	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
光本 茂記, 高萩 縁, 植田 洋匡, 勝本 清隆, 原 孝夫, 日隈 克美	ノンリフト・バルーンによる雲底高度付近での上昇・下降流の測定(速報)	日本気象学会1987年 秋季大会	札 幌	62.10
栗田 秀實, 内田 英夫, 光本 茂記, 植田 洋匡, 溝口 次夫	中部山岳地域のバックグラウンドオゾン—高濃度の発生及びその機構—	第28回大気汚染学会	東 京	62.10

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	刊 年
有沢 雄三, 河村 武, 栗田 秀實, 光本 茂記, 植田 洋匡	弱い傾度風下で長距離輸送をもたらす 大規模風の形成機構	環境科学シンポジウ ム1987	東 京	62.11
栗田 秀實, 内田 英夫, 光本 茂記, 植田 洋匡, 溝口 次夫	中部山岳地域におけるバックグラウン ドオゾン濃度と黄砂現象	1988年日本気象学会 春季大会	柏	63.5
光本 茂記	斜面風(流)の室内実験	日本気象学会1988年 会秋季大会	仙 台	63.10
光本 茂記, 高萩 縁, 植田 洋匡	ノンリフト・バルーンによる雲底高度 付近の上昇・下降流の測定	文部省科研費「集中 豪雨のメカニズムと 予測に関する研究」 研究発表会	東 京	1.1
光本 茂記	「環境流体力学」からの2, 3の話題	日本物理学会第44回 年会	平 塚	1.3
光本 茂記, 溝口 次夫, 栗田 秀實, 早狩 進	日本列島におけるバックグラウンド・ オゾン濃度について—1983年～現在 の連続測定より—	日本気象学会1989年 春季大会	東 京	1.5
村野健太郎, 関口 恭一, 岡田 幸治, 佐々木一敏, 泉 克幸, 尾崎 裕, 福山 力, 氏家 淳雄	酸性霧中のカルボン酸の測定	日本化学会第52春季 年会	京 都	61.4
村野健太郎	大気エアロゾル霧中イオン成分の分布 について—特に航空機調査から—	第3回イオンクロマ トグラフィーフォー ラム	甲 府	61.11
村野健太郎, 関口 恭一, 佐々木一敏, 尾崎 裕, 福山 力, 氏家 淳雄	赤城山の南東面に発生する酸性霧の化 学組成	文部省「環境科学」 第1回環境科学シン ポジウム	東 京	61.11
村野健太郎, 関口 恭一, 佐々木一敏, 尾崎 裕, 福山 力, 氏家 淳雄	赤城山の南東面に発生する霧の化学組 成(II)	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
村野健太郎, 関口 恭一, S.Salazar, 尾崎 裕, 福山 力, 氏家 淳雄, 大喜多敏一	酸性霧中のアルデヒド, カルボン酸の 測定	日本化学会第54春季 年会	東 京	62.4

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
K.Murano, K.Sekiguchi, S.Salazar, K.Izumi, Y.Ozaki, T.Fukuyama, A.Ujiiie, T.Okita	Determination of aldehydes and carboxylic acids in acid fog on Mt. Akagi in Japan	6th Int. Symp. CACGP Global Atmos. Chem.	Peterborough (Canada)	62. 8
村野健太郎, 関口 恭一, S.Salazar, 尾崎 裕, 泉 克幸, 福山 力, 氏家 淳雄	霧の酸性度とガス・エアロゾル濃度の相関	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
関口 恭一, 村野健太郎, S.Salazar, 土屋 哲, 原 善彦, 福山 力, 氏家 淳雄	赤城山の南東面に発生する霧の化学組成(Ⅲ)	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
村野健太郎	公定分析法に向けてのイオンクロマトグラフィー—大気汚染物質—	第4回イオンクロマトグラフィーフォーラム	津南町 (新潟県)	62.10
村野健太郎, 大喜多敏一, 堀江 勝洋, 松本 光弘, 福山 力, 戸塚 績	林内雨の物質収支(1)波丘地実験施設の結果	日本化学会第56春季年会	東 京	63. 4
Y.Ikeda, K.Omoto, K.Murano, K.Sekiguchi	The estimation of the chemical species in fog at the top of Mt. Akagi by a mathematical model	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10
村野健太郎, 尾崎 裕, 泉 克幸, 福山 力	大気中の過酸化水素ガスの測定	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
村野健太郎, 大喜多敏一, 堀江 勝年, 松本 光弘, 戸塚 績	森林への大気汚染物の沈着	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
関口 恭一, 村野健太郎, 土屋 哲, 池田 有光, 原 善彦, 福山 力	赤城山の南東面に発生する霧の化学組成(Ⅳ)	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
大原真由美, 村野健太郎, 瀬戸 信也, 福山 力, 溝口 次夫	中国山地に発生する放射霧の化学組成	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
池田 有光, 平岡 正勝, 村野健太郎, 関口 恭一	数学モデルによる赤城山の霧水中の化学種の推定	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開 催 都 市 名	刊 年
村野健太郎, 植田 洋匡, 若松 伸司, 鶴野伊津志, 酒巻 史郎, 水落 元之, 宝来 俊一, 栗田 秀實, 薩摩林 光, 広沢伊一郎, 早田 寿文, 鈴木 英治, 吉村賢一郎	九州地域における大気汚染観測(2)― 粒子状物質並びに降水中の各種イオ ンの挙動	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
村野健太郎, 尾崎 裕, 泉 克幸, 福山 力	大気中の過酸化水素の測定	1988年会環境科学シ ンポジウム	東 京	63.11
村野健太郎, 藤沼 康実, 福山 力, 秋元 肇	水田からのメタン放出量の測定(I)	日本化学会第58春季 年会	京 都	1.4
薩摩林 光, 仙波 道則, 前沢 正和, 鬼頭喜美代, 水庫 英喜, 横内 陽子, 村野健太郎, 植田 洋匡	降水中の有機物質の組成	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
村野健太郎, ソニアサラザール, 泉 克幸, 福山 力	二重管型拡散デニューターによる大気 中のアンモニア, アンモニウム塩の 分別定量	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
金子 一彦, 村野健太郎, 尾崎 裕, 福山 力	大気中の過酸化水素ガスの測定(II)	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
村野健太郎, 若松 伸司	我が国における酸性雨の全国的状況 (4)―降水のイオン組成とイオン成 分間の相関, 各種イオン成分降下量 のレベルと空間分布―	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
村野健太郎, 植田 洋匡, 若松 伸司, 鶴野伊津志, 植野 康成, 大原真由美	九州地域における大気汚染観測(6) ―航空機による雲水中のH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 及び 各種イオン濃度の測定―	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
宝来 俊一, 大原真由美, 早田 寿文, 宇都宮 彬, 大塚加代子, 植野 康成, 今村 修, 森崎 澄江, 堤 義則, 村野健太郎	九州地域における大気汚染観測(8) ―九州全域における雨の分析―	第30回大気汚染学会	川 崎	1.11
村野健太郎, 藤沼 康実, 金子 一彦, 福山 力, 鷺田 伸明, 秋元 肇	水田からのメタン放出量の測定(II)	環境科学会1989年会	東 京	1.12
村野健太郎	酸性雨について	第2回大気汚染研究 協会九州支部総会	別 府	2.2

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
村野健太郎	赤城山の酸性霧	酸性雨と酸性霧の土壌・植物影響講演会	東 京	2. 2
S.Wakamatsu, K.L.Schere, I.Uno	A Study using a three-dimensional photochemical smog formation model under conditions of complex flow	7th World Clean Air Congr.	Sidney (Aust.)	61. 8
若松 伸司, 鶴野伊津志, 中村 晃	都市域の高濃度大気汚染と拡散機構	文部省「環境科学」第1回環境科学シンポジウム	東 京	61.11
若松 伸司, 鶴野伊津志, 中村 晃, 斎藤 進, 秦野 克美	都市域における気象特性と拡散(2) —SF <sub>6</sub> によるトレーサー実験—	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
若松 伸司, 鶴野伊津志, K.L.Schere	Urban Airshed Model (SAI)を用いた東京首都圏地域の光化学大気汚染のシミュレーション	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
栗田 秀賢, 若松 伸司, 鶴野伊津志, 植田 洋匡	局地的降水に伴う重力流と長距離輸送機構の相互作用	第27回大気汚染学会	京 都	61.11
S.Wakamatsu, I.Uno, K.L.Schere	Application of a three-dimensional photochemical smog formation model to the Tokyo metropolitan area	NATO/CCMS 16th Inter. Tech. Meet. Air Pollut. Modelling Appl.	Lindau (Germany)	62. 4
S.Wakamatsu, I.Uno, R.A.Wadden	Ozone prediction using source reconciliation of ambient hydrocarbons	80th Ann. Meet. APCA	New York (USA)	62. 6
若松 伸司, 鶴野伊津志	三次元モデルを用いた東京首都圏地域における光化学大気汚染の解析	土木学会第42回年次学術講演会	札幌	62. 9
若松 伸司, 鶴野伊津志, 植田 洋匡, 上原 清, 立石ヒロ子	九州北部地域の大气汚染機構(1) —成層圏O <sub>3</sub> の沈降過程—	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
若松 伸司, 鶴野伊津志, 植田 洋匡, 村野健太郎, 酒巻 史郎, 水落 元之	九州北部地域の大气汚染機構(2) —O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> 濃度の立体分布—	第28回大気汚染学会	東 京	62.10
若松 伸司	日本における大気汚染濃度の最近の傾向	環境科学シンポジウム1987	東 京	62.11
S.Wakamatsu, I.Uno	Study on the urban O <sub>3</sub> and its precursors using a three-dimensional photochemical simulation model covering the Tokyo area	The 2nd Int. Conf. on Atmos. Sci. & Appl. to Air Qual.	Tokyo	63.10

発 表 者	題 目	学 会 等 名 称	開催都市名	刊 年
S.Wakamatsu	Study of long-range transport and deposition of air pollutants in Japan	The 1st Korea-Japan Environ. Sci. & Technol. Symp.	Seoul (Korea)	63.11
若松 伸司, 鶴野伊津志, 牧野 宏, 相原 敬次	海風時におけるオゾン濃度の垂直分布—海岸付近におけるラジコン飛行船を利用した観測—	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
若松 伸司, 植田 洋匡, 鶴野伊津志, 村野健太郎, 酒巻 史郎, 水落 元之, 栗田 秀實, 藤摩林 光, 広沢伊一郎, 早田 寿文, 鈴木 英治, 吉村賢一郎, 宝来 俊一	九州地域における大気汚染観測(1)—ガス状物質の移流・変質過程—	第29回大気汚染学会	仙 台	63.11
若松 伸司, 鶴野伊津志, 植田 洋匡, 上原 清	成層圏オゾンの対流圏への輸送現象	環境科学会1988年会	東 京	63.11
若松 伸司, 鶴野伊津志, 中村 晃, 金安 公造	都市域における大気拡散実験	第25回衛生工学研究 討論会	東 京	1 . 1
S.Wakamatsu, I.Uno, R.A.Wadden	Specification of boundary values and source characteristics for ozone prediction in a complex airshed	82nd AWMA Annu. Meet. & Exhib.	Anaheim (U.S.A)	1 . 6
牧野 宏, 相原 敬次, 三村 春雄, 若松 伸司, 鶴野伊津志	神奈川県山岳部(大山)におけるオゾンの挙動について	第30回大気汚染学会	川 崎	1 . 11
若松 伸司, 植田 洋匡, 鶴野伊津志, 村野健太郎, 酒巻 史郎, 須山 芳明, 宇都宮 彬	九州地域における大気汚染観測(3)—大気汚染物質の立体分布—	第30回大気汚染学会	川 崎	1 . 11
若松 伸司, 鶴野伊津志, 山下 敬則, 森 淳子	雲仙野岳における大気汚染物質の挙動	1989年会環境科学シ ンポジウム	東 京	1 . 11
若松 伸司, 鶴野伊津志, K.L.Schere, R.A.Wadden	光化学大気汚染三次元モデルの感度解析	第26回衛生工学研究 討論会	福 岡	2 . 1

平成元年度 編集委員会

委員長	後藤典弘	委員	笹野泰弘
副委員長	相馬光之	〃	高松武次郎
〃	海老瀬潜一	〃	彼谷邦光
委員	竹内正	〃	兜真徳
〃	宇都宮陽二郎	〃	古川昭雄
〃	田村正行	〃	上原清
〃	藤井敏博	事務局	古田早苗

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM  
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告  
SR-7-'91

平成3年3月20日発行

編集 国立環境研究所 編集委員会  
発行 環境庁 国立環境研究所  
〒305 茨城県つくば市小野川16番2

印刷 株式会社 イセブ  
〒305 茨城県つくば市天久保2-11-20

Published by the National Institute for Environmental Studies  
Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan  
March 1991