

---

## 日本列島より発生する微粒子汚染質の広域拡散過程とその自浄作用機構の研究

Studies on the behavior of aerosol particles dispersing from Japan Islands over ocean and the physical processes of scavenging of aerosol particles from the atmosphere

代表研究者	名古屋大学空電研究所	教授	石川晴治
協同研究者	名古屋大学空電研究所	助教授	高木増美
	名古屋大学空電研究所	助手	森田恭弘
	名古屋大学空電研究所	助手	岩田晃
	名古屋大学空電研究所	助手	近藤豊
	名古屋大学空電研究所	技官	金田昌広
	名古屋大学空電研究所	技官	鳥山哲司
	東京理科大学理学部	教授	関川俊男
	気象研究所 高層物理研究部長		三崎方郎

In continuation of aircraft measurement of atmospheric pollutant distribution over land and over ocean, which was carried out in early spring of 1977, we have made similar second aircraft measurement in westerly wind regime in winter of 1978 to see pollutant distribution in vertical, and horizontal direction of one dimension.

Similarity in vertical distributions between over land and over near coast ocean as found in 3 km thick lowermost layer of the atmosphere in westerly wind regime proves sufficient mixing to appear in the layer with injected pollutants diffusing upward from the anthropogenic land sources. This together with typical overhanging pattern of aerosol distributions stretching leeward in typical westerly wind regime, which had been obtained in the aircraft measurement carried out on fair weather condition in westerly wind regime in 1975, definitely suggests the predominance of dilution effect by diffusion, and transport to be found in the natural scavenging of pollutant from the atmosphere.

Compared with the pollutant distribution survey in westerly wind regime, two dimensional measurement of pollutant distribution in horizontal plane covering the same area found in typical transient weather regime in early spring is found clearly to show appreciable deformation from the overhanging distribution pattern, and actually the distribution is found to show lower pollutant density in the inner portion of the survey area, while gradually increasing density toward periphery area. Adding up to two dimensional measurement taken in a horizontal plane, vertical pollutant distribution that showed two air-mass construction, with one above the other, and back up humidity measurement carried out in the same period are found definitely to stress scavenging effect by downward air motion inside high pressure moving eastward in the transient weather regime in early spring.

Preliminary horizontal survey in one dimension of pollutant distribution made over through injection area located in westerly wind regime is found to show appreciable scavenging appearing leeward.

## 研究の目的

日本列島から大気中に放出された微粒子汚染質は広く大気中を移動拡散し、この間に種々の変化をうけ同時に大気中に生じている大気現象と密接にかかわりあっているものである。これら大気中に放出された微粒子はとくに冬期にはシベリアから吹きだし、日本海をわたってくる偏西風に乗ってその濃度と質をかえつつ、表日本の海洋大気中に張りだし、やがて海洋大気のバックグラウンド汚染を形成してゆく。このような微粒子汚染質の動向を地域的規模から地球的規模にわたり調べることは微粒子の広域拡散過程や大気中の種々の物理的、化学的作用とのかかわりあいを明らかにする上で、又地球大気バックグラウンド汚染の形成過程を知るために非常に重要である。

以上のことから本研究の目的として実大気中における微粒子汚染質の濃度、粒径分布などを水平および垂直の二方向にわたり航空機観測用の各種測定器を用いて実測することにより陸地の発生源から汚染拡散の極限であるバックグラウンドの状態への途中の過程を把握し、その間に起っている自浄作用の機構を明らかにすることとした。

## 研究経過

陸起源の微粒子が陸から海へ吹きだす風系によって広く海洋へ張りだす実体と、その濃度減少を生じる自浄作用の過程を明らかにするために昭和52年3月と昭和53年1月に計4回の航空機観測を行った。これらの観測の具体的内容はシベリアからの偏西風が日本列島で卓越する時期と偏西風の吹きだしがゆるむ季節を選び(1)太平洋側の陸上と海上での垂直分布の比較(2)日本列島をはさんで日本海側と太平洋側の洋上における垂直分布の比較(3)三河湾から大島、八丈島を含む東海沖の海洋上の一定高度における水平分布(4)偏西風の通過する若狭湾沖から敦賀、伊吹山地、関ヶ原、名古屋、三河湾沖への一定高度での水平分布の観測を行なった。

これらの観測は従来まで我々が行ってきた航空機観測に比べて微粒子の濃度、粒径分布の他に気体汚染質としての窒素酸化物( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )、オゾン濃度、ラドン濃度、気温、気圧、露点を測定要

第1表 航空機観測の概要

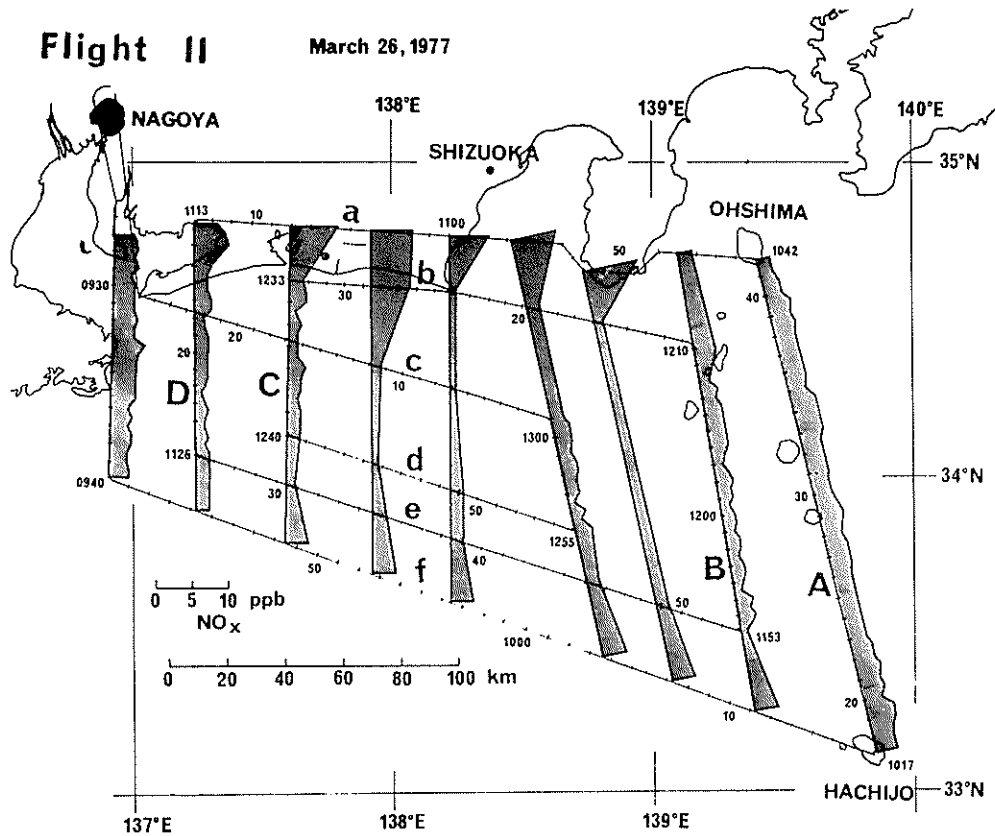
飛行 No.	日時	測定高度 (m)	測定要素
F-I	1977. 3.31 0934—1230	0—3000	大粒子 (エアロゾル) (半径 0.15—5 $\mu\text{m}$ ) 小粒子 (エアロゾル) (半径 0.012—0.375 $\mu\text{m}$ ) 窒素酸化物
F-II	1977. 1.26 0920—1338	1000	オゾン ラドン 気温
F-III	1978. 1.14 1039—1434	0—3000	気圧 露点
F-IV	1978. 1.19 1057—1439	0—3000	

素に加えることにより総合的な観測を行うことができた。このうちラドン濃度計は本研究の第1年度に本助成金をもって航空機観測用として製作したものである。ラドンは陸地表面からのみ発生する放射性ガス体であるので、ラドン濃度の空間分布を実測することにより大気汚染の水平、垂直方向の移動拡散の状態を把握することができる。第1表に今回行った航空機観測の概要を示した。

## 研究成果

### 1. 水平分布

三河湾から大島、八丈島を含む東海沖の海洋へ微粒子汚染質や  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  などの窒素酸化物がどのように張りだしその濃度を減少させてゆくかを調べるためにこの領域を高度 1000 m で観測した (F-II)。第1図に窒素酸化物  $\text{NO}_x$  の水平分布を航跡図の上に重ねて示した。第2, 3図に半径 0.15  $\mu\text{m}$  以上の大粒子数、半径 0.012  $\mu\text{m}$  以上の小粒子数の等濃度図をそれぞれ示した。今回得られたこれらの高度 1000 m における水平分布の特徴は従来の分布と比べ、中京地域から伊勢志摩にかけての汚染源地帯から放出された汚染物質が偏西風によって東方へ輸送され、遠州灘から伊豆沖まで張りだし、その間、凝集、沈降、拡散、その他の各種の物理的、化学的なプロセスによって次第にその濃度を減少してゆく点は両者ほぼ同じであるが、航行域の南側、東側周辺域にかけての陸地から遠くはなれた外周上でかえって汚染濃

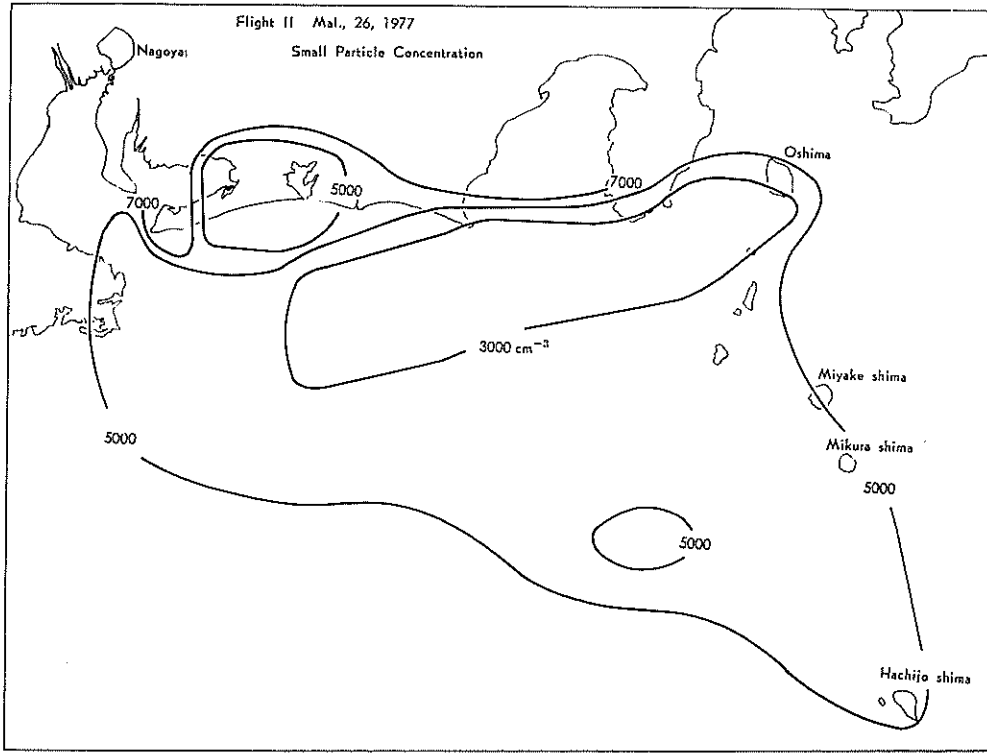


第 1 図 NO<sub>x</sub> の等濃度水平分布 (1977 年 3 月)

度が高まっており、観測域中央部ではかえって低い濃度を示している点が異なる。第 4 図に参考のため従来の結果の 1 例を示した。これは 1975 年 3 月に同じ海域を高度 1000 m で観測したときの大粒子数の等濃度図である。この図では明らかに陸上から海上へ進むにつれて微粒子の濃度は急激に減少し、陸上から海上約 300 km 附近でのその値はバックグラウンドに近い。

今回の水平分布の特徴をさらに明らかにするため第 1 図に NO<sub>x</sub> の水平分布と重ねて示されている回周航跡を東西および南北航行線分区に分け、東西方向の航跡を北から順番に (a) 10:42-11:13 (b) 12:10-12:33, (c) 13:02-13:22, (d) 12:40-12:55, (e) 11:26-11:53, (f) 09:40-10:17 の 6 ケの東西航行線分区に、また南北方向を同様に東側から順番に (A) 10:17-10:42, (B) 11:53-

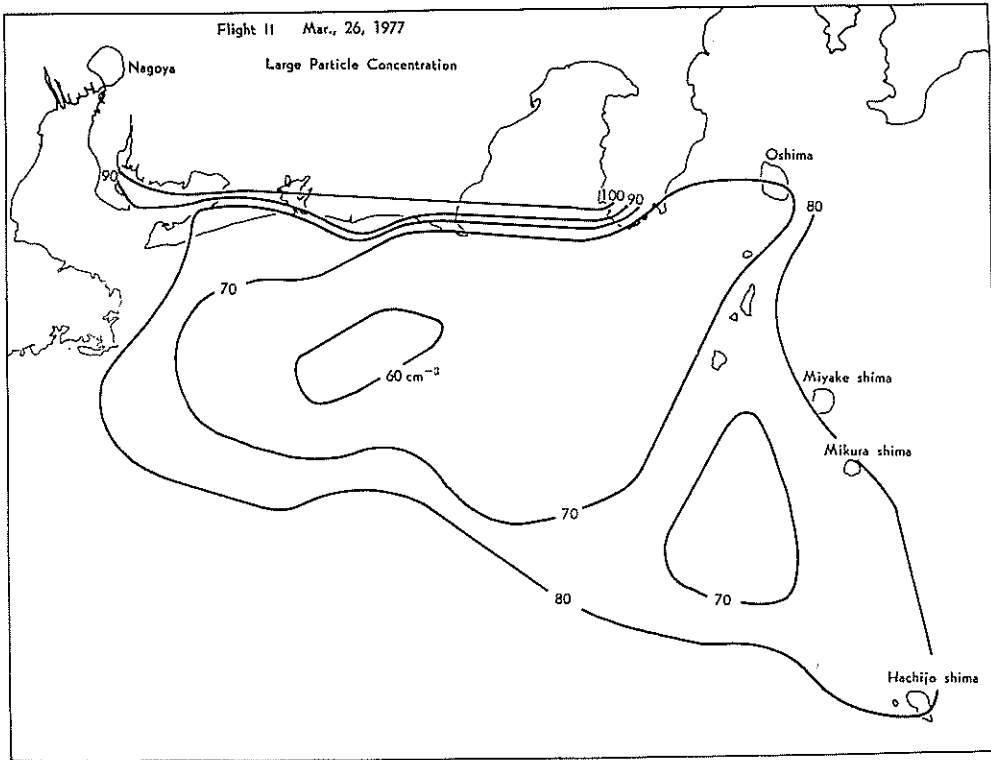
12:10, (C) 12:33-12:40, (D) 11:13-11:26 の 4 ケの南北航行線分区に分けて整理した。南北方向の分布をみるための一つの方法として、各南北線区 (A), (B), (C), (D) 上の北端にその位置がくる陸地海岸点 (主に本州南岸点) をその線区の原点にとり、それから南へ測った距離を、各線区 (A) …… (D) 上の分布を示すグラフ表示の横軸にとり、縦軸には各南北線分区上の各航行点における大粒子と NO<sub>2</sub> の観測値をそれぞれとり、グラフに表わしたものをそれぞれ第 5, 6 図の上段に掲げた。また南北方向の平均化された大粒子、NO<sub>2</sub> の濃度分布をみるための方法として、それぞれ各東西線分区 (a) …… (f) 上で得られた各測値の全平均を各線分区について求め、それを各々 (a) …… (f) 線分区上の平均された値とし、これを縦軸にとり横軸には前と同様各線分区 (a)



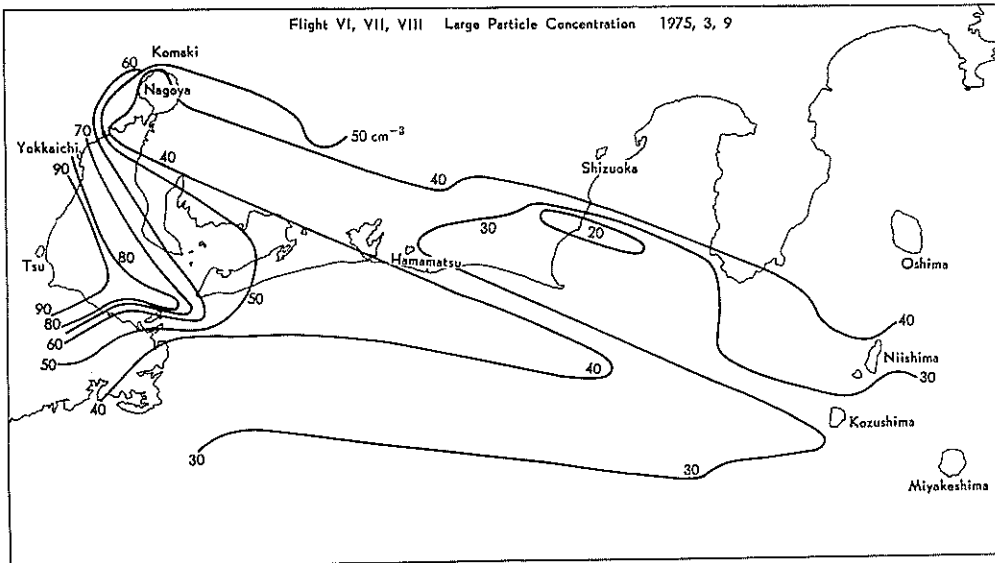
第 2 図 大粒子数の等濃度水平分布 (1977 年 3 月)

…(f) の陸からの南へ測った距離をとったグラフ表示を考え、これらをそれぞれ第 5, 6 図の下段に示した。これらの図から明らかなことは大粒子、 $\text{NO}_2$ とも陸起源であり陸上から海上へ出るに従いその濃度は低下してゆくことで、両者の変化の間の相関は良好である。陸上での大粒子数の平均レベルは  $90 \text{ cm}^{-3}$ 、海上では  $60\text{--}70 \text{ cm}^{-3}$ 、 $\text{NO}_2$  の平均レベルは陸上で  $3 \text{ ppb}$ 、海上で  $1 \text{ ppb}$  以下である。今回の航空機による水平分布の観測結果の特徴は陸から遠くはなれ、観測海域中央部を越えて外側周辺部へ近づく汚染の濃度が高くなってゆくという点であることはすでに触れた。この傾向は第 5, 6 図の下段を見れば一目瞭然で、本州海岸から南下してその距離が増すと汚染濃度は、はじめ減少するが一度極小をすぎた後、さらに南下と共にその濃度はかえって増加する。陸起源の微粒子と  $\text{NO}_2$  が今回のように一見異常とも思われる振舞をする理由のひとつとしてあげられるも

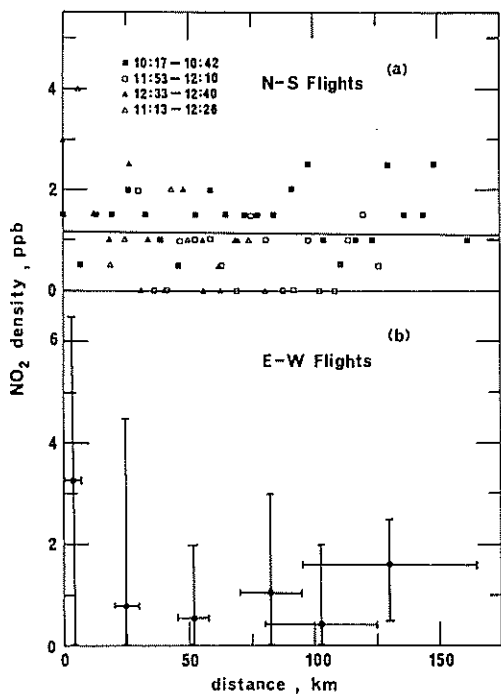
のに、観測領域の中央部を越えて陸から遠くはなれた外側に認められた、陸性のより強い気団の存在がある。すなわち、我々が今回観測した時間帯におけるこの海域には大気汚染物質が定常的な空間分布として存在していたのではなく、気団の運動に伴う時間変化を合わせもっていたことは疑う余地がない。この観測の行われた 3 月 26 日には丁度中国大陸から黄砂がきており、移動性高気圧が黄砂をその中に含んでゆっくり東進していた。観測領域はこの高気圧の中に入っており、この日の粒子数が全般的に高かったのは黄砂の影響であると考えられる。観測された露点から求めた水蒸気の混合比は観測領域の内側の上空  $1000 \text{ m}$  の高度面内で上空  $3000 \text{ m}$  の高度面の大気を持つべき値を与えた。このことは  $1000 \text{ m}$  の高度に下降流があったことを示している。第 7 図に観測領域周辺の風向分布を示した。図中の A~C の地域で前夜半から朝 6 時頃までにかけて卓越していた



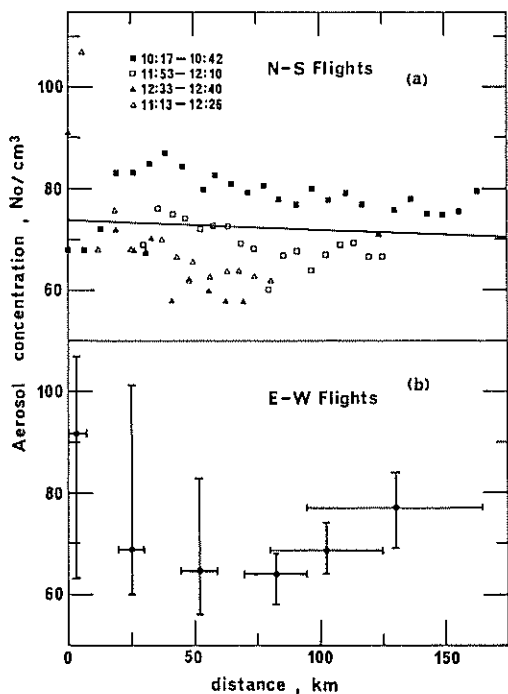
第 3 図 小粒子数の等濃度水平分布 (1977 年 3 月)



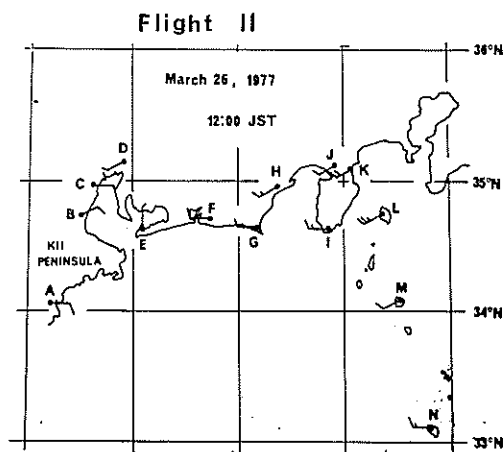
第 4 図 大粒子数の等濃度水平分布 (1975 年 3 月)



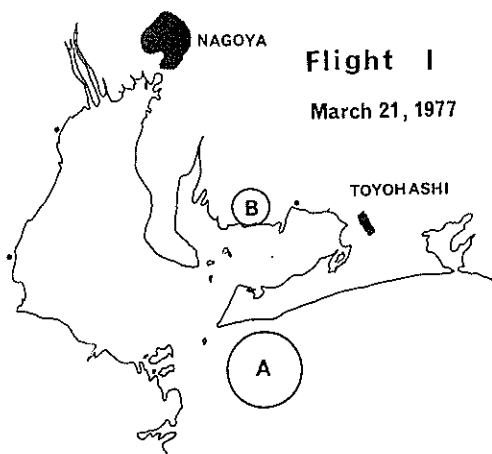
第 5 図 NO<sub>2</sub> の南北方向分布 (1977 年 3 月)



第 6 図 大粒子の南北方向分布 (1977 年 3 月)



第 7 図 伊勢, 志摩から三宅, 八丈に到る海域周辺の各測候所 (気象庁) の資料にもとづく風向分布 (1977 年 3 月 26 日 12:00)

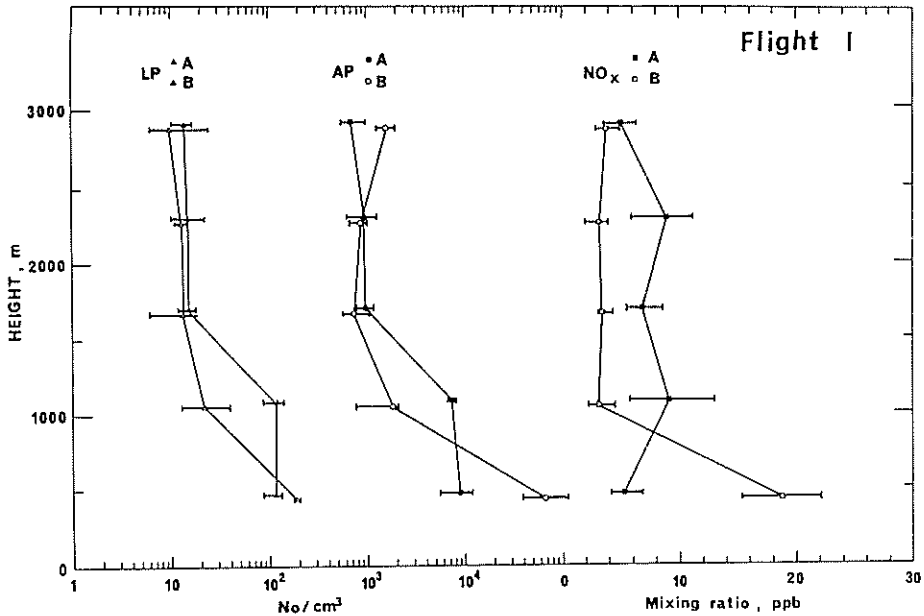


第 8 図 海上 (A) と陸上 (B) の垂直分布の観測点 (1977 年 3 月)

西風が観測の行われた朝から昼にかけて東風に変ったことを除き、全般的にこの時間帯で西風が観測領域に卓越していたことを示している。すなわち観測域はゆっくり東進する高気圧圏内にあり、海面に沿う下層大気には西側周辺の東風域を除き、今回の観測時間帯を通じて一般的に偏西風が卓越していた。

## 2. 垂直分布

陸上の汚染源から張りだした汚染質が大気の垂

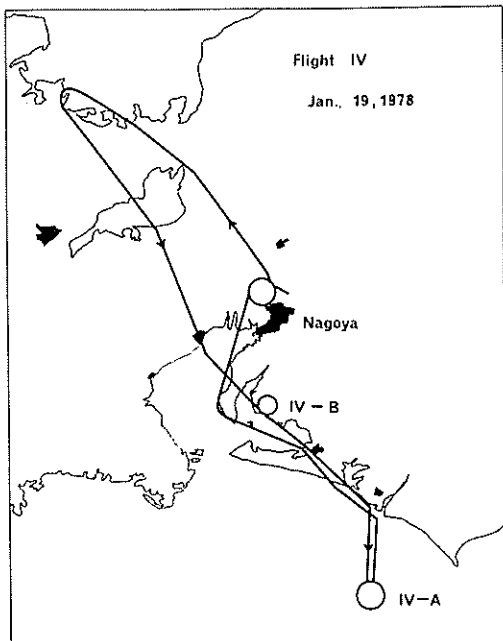


第9図 海上(A)と陸上(B)の観測点(第8図)における大粒子(LP)小粒子(AP), NO<sub>x</sub>の垂直分布

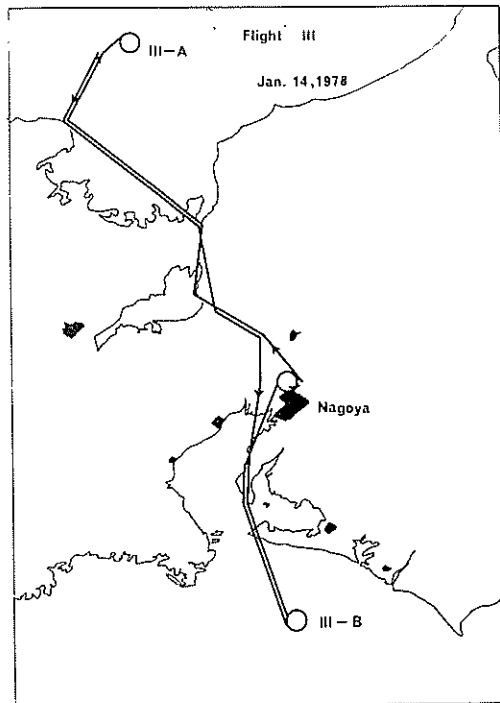
直方向にどのように拡散しているかを調べるために三河湾に面した陸地と渥美半島沖の洋上(F-I)および浜松沖の洋上(F-IV)で垂直分布の観測を行った。第8図にF-Iで観測を行った場所を、第9図にこのときの大粒子(LP),小粒子(AP),NO<sub>x</sub>の垂直分布を示した。図中A,Bは第8図の観測地点A(洋上),B(陸上)に対応している。第10図にF-IVで垂直分布の観測を行った場所を示した。これに対応する大粒子(LP),小粒子の(AP)垂直分布を第11図に示した。Aは海上,Bは陸上であることは第9,10図と同じである。第9,11図からわかるようにF-Iの場合(1977年3月)は1500mより上でA,Bの分布,即ち洋上,陸上の大粒子(LP),小粒子(AP),NO<sub>x</sub>の垂直分布は測定精度を考慮する時比較的良好に一致しており,F-IV(1978年1月)では洋上(A),陸上(B)の垂直分布は大粒子,小粒子ともに非常に良く一致していることがわかる。このとき同時に観測したNO<sub>x</sub>についても同様によく一致していた。第9図の結果は偏西風の弱くなったときに得られたものであり,第11図の分布は偏西風の吹きだしのつよい時期に得られた

ものである。このことから考えると偏西風の吹きだしの強かったこのときには(F-IV),少なくとも太平洋上のIV-A地点(第10図)まで陸上の汚染質が高度3000mまでそのままの形で張りだしてきていたことがわかる。これに反して冬型の気圧配置の弱まっていたF-Iの場合は,このときのA地点がF-IVのIV-A地点よりも陸地に近いにもかかわらず,陸上B地点から洋上のA地点まで汚染質が張りだす間に,1500m以下の分布はとくに大きな変化をうけていたことがわかる。F-IとF-IVの二つの場合,垂直分布の比較から,陸上汚染の洋上への拡散過程は明らかに偏西風のつよさに依存していることがわかる。同時に観測した気温と露点の垂直分布はF-Iの場合A,B両地点で1500m上下での気塊が互いに異っており,F-IVの場合3000mまでA,B両地点とも同じ気塊であったことを示している。

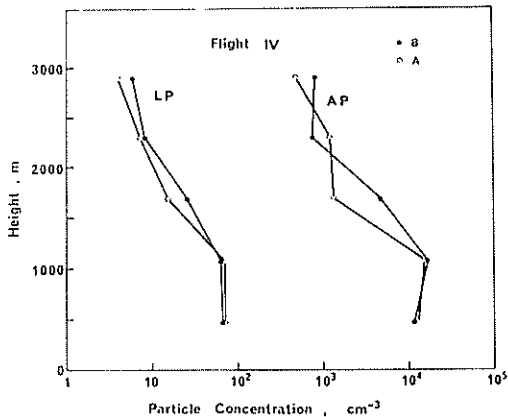
冬型の気圧配置のときに日本列島をはさんで日本海側と太平洋側で微粒子や気体汚染質の垂直分布がどのように異なるか,又,偏西風の通り道である若狭湾沖から敦賀,伊吹山地,関ヶ原,名古屋,三河湾,渥美半島沖へ到る一定高度での水平分布



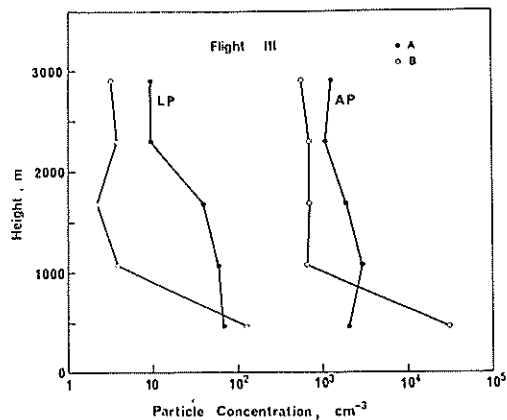
第10図 海上(A)と陸上(B)の垂直分布の観測点(1978年1月)



第12図 日本海側(A)と太平洋側(B)の垂直分布の観測点および航跡図(1978年1月)



第11図 海上(A)と陸上(B)の観測点(第10図)における大粒子(LP)と小粒子(AP)の垂直分布

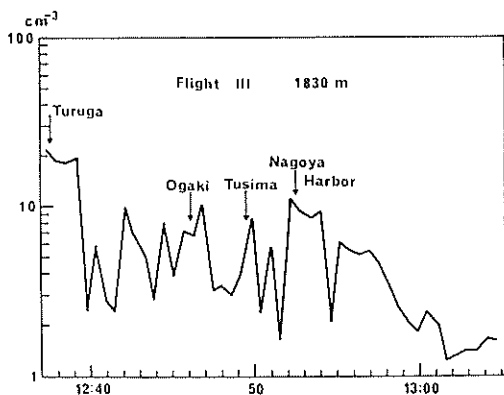


第13図 日本海側(A)と太平洋側(B)の観測点(第12図)における大粒子(LP)と小粒子(AP)の垂直分布

がどうなっているかを知ることは汚染質の移動拡散の動向を知る上で重要である。F-IIIでこの観測を実施することができた。第12図にこのときの航跡図と垂直分布の観測を行った日本海側と太平洋側の位置(III-A, III-B)を示した。第13図にこのとき得られた大粒子(LP)と小粒子(AP)

の垂直分布を示した。黒丸が日本海側(A)、白丸が太平洋側(B)である。1000 mより上では大粒子、小粒子ともに日本海側の方が濃度が高い。このことはNO<sub>x</sub>についても同様であった。





第14図 敦賀、伊吹山地、関ヶ原名古屋港へいたる高度1830mにおける大粒子数の水平分布(1978年1月)

又、太平洋側の分布は500mでの濃度が高く、以後急激に高さと共に1000mまで減少しているが、日本海岸では濃度の高さによる減少はゆるやかである。上記の特徴は次のように考えられる。このとき日本海側の観測点附近は高度3000m以上にわたって雲が形成されていた。このことは日本海側の観測点附近で海面から上空まで空気の混合が盛んであることを示している。そしてこれが日本海側の垂直分布を決定し、高さに対する濃度勾配を小さくしている原因であると考えられる。これに反して太平洋側の分布は前述したように太平洋側の陸上の分布をそのまま反映しているものと考えられる。このときの高度1830mにおける敦賀、名古屋、三河湾にいたる水平分布の観測結果によれば(第14図)、微粒子濃度は都市などの汚染源上空で増加しており、都市域をすぎると減少を示している。このことは都市域で放出された汚染物質がこの高度まで到達していることを示しているが、これらの汚染質は都市域を通過後、急速に減少しており、この濃度減少はこのときの気象条件から偏西風による希釈や気流の上下の運動などの効果の他に雲粒への附着の効果もあったと考えられる。名古屋港を通過して三河湾から太平洋上へかけて同じ高度で微粒子濃度が急激な減少を示していることは、1000m以上の高度で、太平洋側の垂直分布の濃度低下とよく対応していると考えられる。

## 結論

北西季節風の卓越している冬期と、そのゆるむ春先に微粒子と窒素酸化物などの汚染物質の航空機観測を行った結果、次のことが明らかになった。

三河湾から八丈島を含む東海沖の洋上1000mにおける水平分布は、従来まで得られていた陸地からの距離と共に指数関数的に減少するという形態とは全く異った形態があることを今回の航空機による観測は示した。

太平洋側の陸上、洋上における垂直分布には著しい類似性が見いだされ、偏西風の吹きだしの強さと関係があることがわかった。日本海側と太平洋側の垂直分布にはとくにこの両者に関連性は見いだされなかった。又、偏西風の通り道での日本上空の水平分布は都市からの微粒子汚染質の放出をよく反映し、同時に雲粒への附着や、気流の上下流、偏西風による希釈などの自浄作用が存在することを示していた。

以上の水平、垂直分布とも気団の移り変わり、偏西風をつよさ、大気の安定度などが密接にかかわりあり、実大気中に生じている効果的な自浄作用としては微粒子相互の凝集や雲粒への附着に加えて、水平、垂直方向の拡散、気団の入れかわりなどの大気の力学的運動によるものも大きい役割を果たしていることがわかった。

## 今後の問題点

今後の課題としては同種の観測を各季節毎に行い、微粒子を含む大気汚染物質の動態を更に明らかにし、同時に微粒子の組成についても調べてゆくことが重要である。また微粒子と気体汚染物質の最後の運命を知るために大気と海洋の相互作用についても調べてゆくことが重要であると思われる。

## 謝辞

今回、微粒子および窒素酸化物などの各種の測定器を同時に航空機に搭載して移動観測をするという我々の研究分野にとっては非常に大がかりな研究観測を実施することができた。これはひとえに日産科学振興財団のおかげであり、ここに深く感謝の意を表明します。

研究発表

- 1) 森田恭弘・近藤 豊・石川晴治・下道 国; エーロゾルの水平垂直分布, 1977 年 10 月, 日本気象学会 (口述)
- 2) 近藤 豊・森田恭弘・石川晴治・高木増美・岩田晃; 対流圏での NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> およびエーロゾルの飛行機観測, 1977 年 10 月日本気象学会 (口述)
- 3) 近藤 豊・森田恭弘・石川晴治・高木増美・岩田晃; 対流圏エーロゾル, NO<sub>x</sub>, オゾンの水平垂直分布, 1977 年 11 月, 日本電磁気学会 (口述)
- 4) Y. Morita, Y. Kondo, H. Ishikawa, M. Takagi, A. Iwata, M. Kanada and M. Shimo; Result on Aerosol Observation using Aircraft (IV). Proc. Soc. Atmospheric Elect. Japan 18, 24-29 (1977). (in Japanese).
- 5) Y. Kondo, Y. Morita, H. Ishikawa, M. Takagi, A. Iwata, M. Kanada and N. Toriyama; Result on NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> Observation using Aircraft. Proc. Soc. Atmospheric Elect. Japan 18, 30-35 (1977) (in Japanese)