



Title	係留気球による大気境界層内のエアロゾルの測定
Author(s)	石岡, 太; ISHIOKA, Futoshi; 李, 東仁 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 51, 15-34
Issue Date	1988-09-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.51.15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14193
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_p15-34.pdf



係留気球による大気境界層内のエアロゾルの測定

石岡 太・李 東仁

北海道大学大学院環境科学研究科環境構造学専攻

谷口 恭・菊地 勝弘

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和63年7月11日受理)

Observations of the Vertical Concentrations of Aerosol Particles in the Boundary Layer by Means of Tethered Balloon Method

Futoshi ISHIOKA and Dong-In LEE

Division of Environmental Structure, Graduate School
of Environmental Science, Hokkaido University

Takashi TANIGUCHI and Katsuhiro KIKUCHI

Department of Geophysics, Faculty of Science,
Hokkaido University

(Received July 11, 1988)

To study the vertical distributions of number concentrations of aerosol particles in the boundary layer with respect to the particle sizes, observations by means of a tethered balloon method were carried out from the end of August to the middle of September in 1986 on the campus of Hokkaido University, Sapporo. The tethered balloon used was 70 m³ in volume and a particle counter with size ranges of 0.3~0.5, 0.5~1, 1~2, 2~5, >5 μ m in diameter and a digital printer for measuring aerosol particles were used. A tethered sonde for measuring meteorological parameters, that is, wind direction and velocity, air temperature, relative humidity and pressure, was used. These were secured onto the balloon. The maximum arrival height in the observation was 345 m above the ground surface. With the balloon observations, the surface observations of number concentrations of aerosol particles were carried out using the same type of particle counter. Continuous observations of temperature inversion height were made by a sonic radar (SODAR) at the same time and in the same place. In the surface analysis of the sea breeze front, furthermore, the data obtained by AMeDAS

and observation points supported by the Health and Sanitation Bureau, City of Sapporo were used. As a result, highly interesting characteristic findings were obtained in the vertical distributions of aerosol particles in the stable and unstable weather conditions and with the passage of the sea breeze front from the Ishikari Bay.

I. は じ め に

都市域の大気境界層内のエアロゾルの挙動は、エアロゾルの発生源の時間的変動の激しさや局地的な気象の影響の為、これらを正確に把握することは一般に困難である。しかし、この領域のエアロゾルは人間生活に直接影響を与える点からも、その空間濃度分布を知り、気象や都市活動などとの関係を明らかにすることが重要である。そのためには、一点では長期間にわたる観測、しかも気象要素などとの同時観測が必要である。更にこの領域の特徴をより正確に把握するためには、鉛直方向も含めた空間濃度分布を同時に調べることが重要である。

これらの観測は、近年盛んに行なわれており、特にエートケン粒子についての研究が多い。札幌をフィールドとしたものとして、Endow and Magono (1971) は、冬季間のエートケン粒子の水平分布を車を利用して、また、鉛直分布をロープウェイを利用して測定した。また、Endoh et al. (1982) は、同じく札幌で航空機によるエアロゾルの鉛直断面分布を調査した。一方、ミー粒子の鉛直濃度分布の測定は、Patterson et al. (1980) の航空機による、陸上、海上の大気境界層(高度約2 km) 上下での測定例がある。また、Hayashi et al. (1984, 1985) は、ヘリコプターで高度約2 km までの混合層内のエアロゾルを比較的細かく測定した。

この他にもエアロゾルは、いろいろな大気環境の下で観測が行われているが、それらの多くはある粒径範囲のエアロゾルをまとめて測定しており、粒径別にエアロゾル数濃度を直接測定した例はあまり無い。そのため、粒径の異なるエアロゾル粒子の振舞いの差などについては、良く分かっていないのが現状である。また、下層大気境界層、特に地表境界層は、航空機等を使って観測するには高度が低過ぎるために、時間的空間的に連続して測定した例もそれほど無い。そこで、直径0.3 μm 以上のミー粒子を5つの粒径レンジに分けて測定することの出来るパーティクルカウンターを、大型係留気球に搭載して、気象条件の違う幾つかの場合についてエアロゾル数濃度の鉛直分布を測定し、その粒径による振舞いの違いを考察した。

II. 観 測 方 法

観測は、1986年8月24日から9月12日までの20日間、札幌市のほぼ中央に位置する北海道大学構内理学部3号館西側の草地で行った (Fig. 1)。

エアロゾル数濃度の鉛直分布の測定には、容積70 m^3 の大型係留気球を用いた。Fig. 2は、その観測システムを示している。係留ゾンデを出来るだけ傾かないように係留気球から吊り下げ、またパーティクルカウンター、デジタルプリンターは、係留索に固定した。係留気球は、動力式のウインチで上昇、係留、下降させた。光散乱式パーティクルカウンター(リオン社製、KC-01A, 11 kg) の測定範囲は、直径0.3~0.5 μm , 0.5~1 μm , 1~2 μm , 2~5 μm , 5 μm ~の5

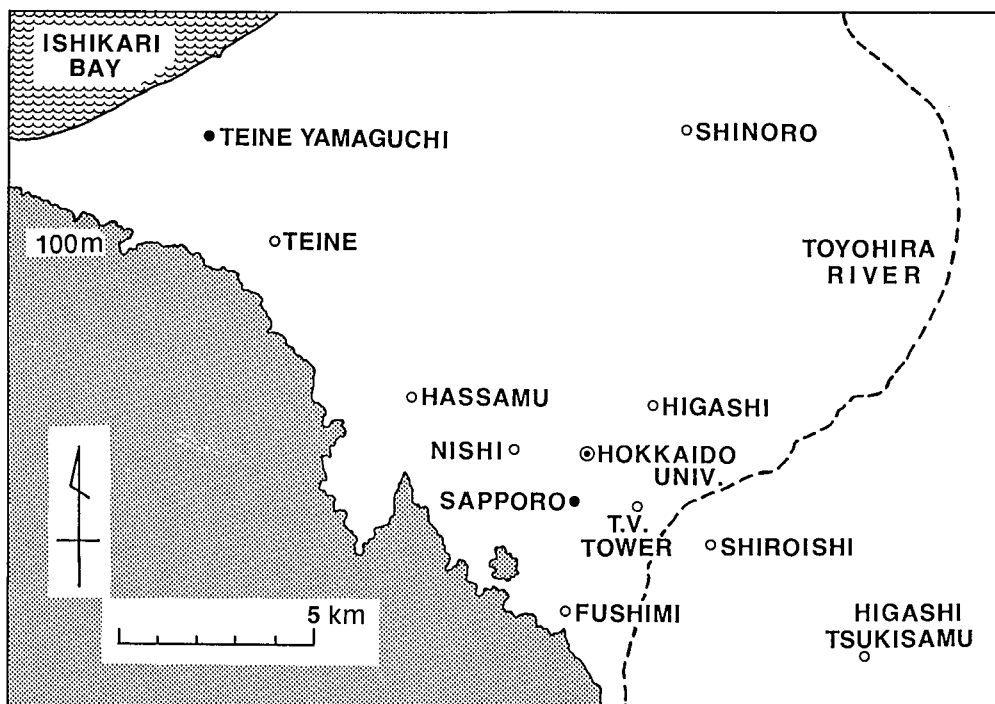


Fig. 1. Map around the observation station (Hokkaido Univ. ; ⊙) and other observation sites supported by J. M. A. (●) and by City of Sapporo (○).

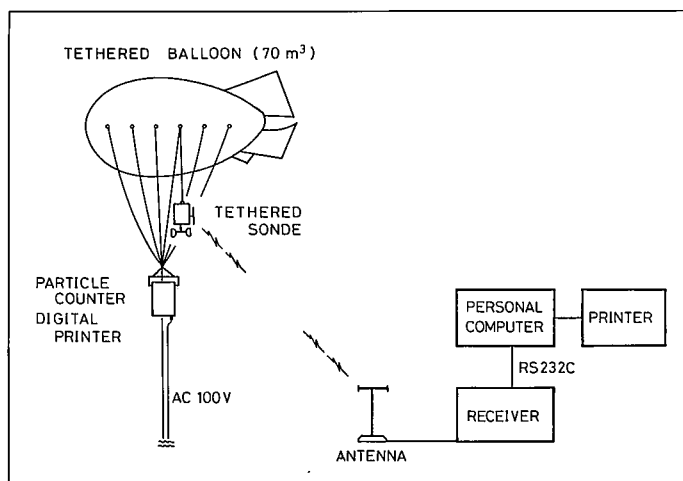


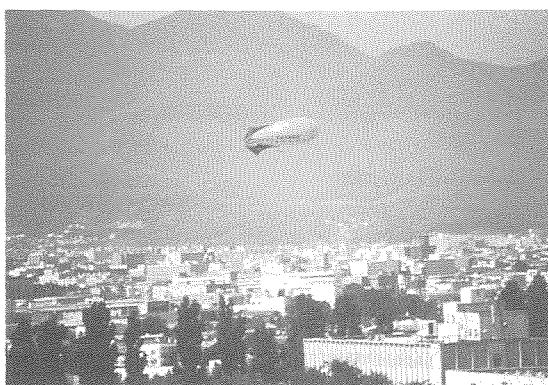
Fig. 2. An observation system using tethered balloon.

レンジであり、観測期間中は2分(1000 cc)毎の値を測定した。計測された粒子濃度は、パーティクルカウンターに接続したデジタルプリンター(リオン社製, KP-02 A, 8 kg)で記録紙にデジタル印字した。

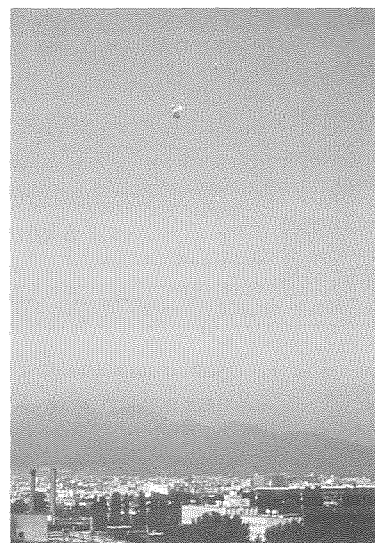
係留ゾンデ(計測科学研究所製, KST-8301, 1 kg)は、風向(0~360°), 風速(0~20 m/s),

気温 ($-20\sim 40^{\circ}\text{C}$), 湿度 ($0\sim 100\%$), 気圧 ($700\sim 1050\text{ mb}$) を測定し, FM 波によって地上へ送信する. 地上に設置した受信装置によって各チャンネルの信号を受信し, デジタル変換した後, RS 232 C 端子を通じて, データ処理を行う FM 16 π へ送った. FM 16 π では, 測定データのモニタリングを行うと同時にプリンターへ出力し, またデータをマイクロカセットに記録した.

係留気球を飛揚させた地点の北東側, 約 15 m の位置にある観測室の中に同様のパーティクルカウンター (KC-01A) とプリンター (KP-01) を設置し, 窓から 2 m の長さのサンプリングチューブを出して地上 1 m の外気を吸引し, 2 分 (1000 cc) 毎のエアロゾル数濃度の値を連続測定した. また, 理学部 3 号館の屋上に設置した音波レーダー (SODAR) で上空 1000 m までの大



(a)



(b)

Fig. 3. Pictures of observation scene.

気の状態を, その他, 風向風速, 気温, 相対湿度を連続測定した. Fig. 3 は観測状況を示している. 特にパーティクルカウンター, デジタルプリンター, 係留ゾンデの総重量は 20 kg にもなるので, 浮力の足りない場合は, Fig. 3 (b) に見られるように, 補助風船をとりつけた.

以上の観測システム, 測器を用いて得られたデータの他に, Fig. 1 の黒丸で示した AMeDAS (手稲山口, 札幌) の気温, 風, 白丸の札幌市衛生局公害部の気温, 風, 浮遊粉塵濃度, NO_x , SO_2 濃度のデータも利用した.

係留気球による観測は, 比較的風の弱い早朝から日中にかけて行った. 数濃度の鉛直分布は, 係留気球を上昇または下降させながら 20~50 m おきの高度に数分係留して測定した. また, 逆転層などが存在している場合には SODAR で大まかな高度を把握し (Hayashi, 1980), その上下では出来るだけ細かく測定するようにした. また早朝のエアロゾルの鉛直分布測定前には, より上空まで風や温度の分布を知るために, 係留気球に係留ゾンデだけを付けて高度 400 m までの測定を行った.

III. 観測結果

観測は、大型係留気球を使用し、たため比較的静穏な状態のときに行った。エアロゾル数濃度の鉛直分布の測定は全部で20回行ったが、各RUNの日付、開始、終了時刻、最大飛揚高度、測定時の大気の状態は、Table 1にまとめてある。

Table 1. List of observation records.

DAY	RUN NO.	START TIME	END TIME	MAX. HEIGHT(m)	CONDITION
AUG. 24	1	09:52	11:31	100	
AUG. 26	1	06:15	08:16	195	
	2	08:18	10:09	150	
	3	10:11	11:25	150	MIX. LAYER
	4	11:27	12:39	100	MIX. LAYER
AUG. 27	1	05:51	07:22	240	INV. LAYER
	2	07:33	10:08	345	
AUG. 28	1	04:45	09:24	290	INV. LAYER
	2	09:26	11:02	280	MIX. LAYER
	3	11:20	12:44	200	MIX. LAYER
	4	13:08	14:20	150	SEA BREEZE
SEP. 2	1	03:59	06:26	210	INV. LAYER
	2	08:57	11:28	250	MIX. LAYER
	3	11:30	15:16	150	SEA BREEZE
SEP. 3	1	07:55	09:27	140	
	2	11:11	13:41	150	
SEP. 8	1	04:43	08:37	150	
SEP. 9	1	06:47	07:43	170	INV. LAYER
	2	08:03	10:45	100	
SEP. 12	1	07:52	09:39	130	

IV. エアロゾル数濃度の鉛直分布

Endow and Magono (1971)によると、冬季の札幌のエアロゾル数濃度の鉛直分布は、午前中の接地逆転層の解消する直前では上下の差が大きく、地上が 10^5 個/ccであるのに対し、400 m上空では 10^3 個/ccと約2桁の違いがあった。また、Endoh et al. (1982)は同じく札幌で、不安定な大気成層の時に航空機によるエアロゾルの鉛直断面分布を調査し、市の中心部では定常的に高濃度のエアロゾルの分布が見られ、それが上昇流によって1200 m迄も持ち上げられていることを明らかにした。また、Harimaya et al. (1985), Kikuchi and Yoshida (1987)は、接地気層内のCN (Condensation Nuclei)について鉛直濃度分布を測定し、気温の鉛直分布と関係のあることを示している。以上の様に、粒径の小さなエアロゾルについては濃度の鉛直分布と気温の鉛直分布との関係を測定した例はあるが、それ以上の粒径ではそれほど調べられていないので、サブミクロンからミクロンサイズの粒径のエアロゾル数濃度の鉛直分布を、安定度の違う気層について調査した。

1. 安定時のエアロゾル数濃度の鉛直分布

<1986年8月28日の例>

Fig. 4(a)は、係留ゾンデで測定した気温から計算した温位と、風向風速の鉛直プロファイルを示

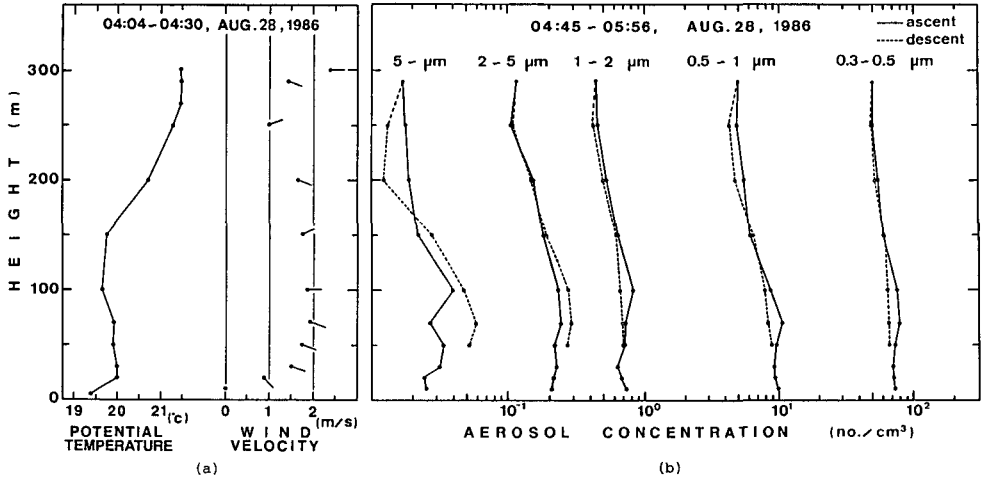


Fig. 4. Vertical profiles of potential temperature, wind velocity and aerosol concentrations on August 28, 1986.

している。また、Fig. 4(b)は図の上部に示した5レンジの粒径別のエアロゾル数濃度の鉛直プロファイルで、実線は気球を上昇させながら黒丸の対応する高度で測定したもの、破線は下降させながらの測定を示している。

この日は、上空まで弱い東～南東風が吹いていて、温位のプロファイルよりおよそ100mまではほぼ中立な気層、それより上空には温度逆転の層が形成されていたことがわかる。エアロゾル数濃度は、100mまでの中立な気層では上下の差はあまり無いが、それより上の逆転層では全ての粒径レンジで上空へ行くほど減少する傾向を示している。しかも5µm以下では、時間変化があまり無く定常状態にあったといえる。森田・高木(1981)は、大気が絶対安定の場合、高度500m～1000mでエアロゾルの濃度が減少することを示しているが、これ以下の層でも、この様に気層の安定度とエアロゾル数濃度は、かなり良い対応関係を示し、この傾向は他の日の例でも見られた。

<1986年8月27日の例>

この日は、Fig. 5に示されるように地上付近は西から南西の風、上空150m迄は南よりの風が吹いていた。その上層は、高度200mが東南東の風であったが、その上下の層は南東風だった。気層は中立か、70mより上層に200m付近をトップとする弱い逆転層があった。エアロゾル数濃度の鉛直分布は、70mまでの中立な気層では、多少の時間変化はあるものの、どの粒径でも上下の濃度差が余りなかった。しかし、逆転層トップの200m付近では、特に気球の上昇時の測定で、かなり数濃度が高くなっていった。またその上層の240mでは、70m以下の層の濃度レベルに戻っ

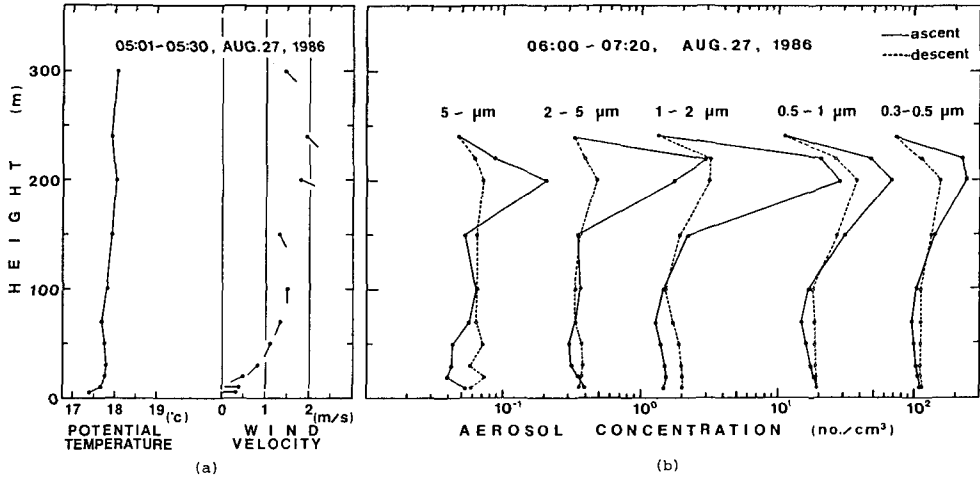


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for August 27, 1986.

ている。これを Fig. 6 の様に各高度でのエアロゾル数濃度の粒径分布にすると、高度 50 m ~ 150 m までと、逆転層の上空の 240 m では、数濃度に若干の差こそあるものの、分布の形はよく似ている。しかし、ほぼ逆転のトップに対応する 200, 220 m では数濃度も、分布の形も大きく違っている。このことから、この高濃度の層のエアロゾルは、上下の層のエアロゾルとは、起源が違ふと考えられる。200 m 付近の層は、その上下が南東風なのに対して東南東の風であり、また下降時の測定では数濃度のピークも小さくなっていることから、この層だけに、鉛直方向には余り拡散されずに厚さ数 10 m の高濃度のエアロゾル粒子を含む気塊が、一時的に移流してきたのではないかと考えられる。

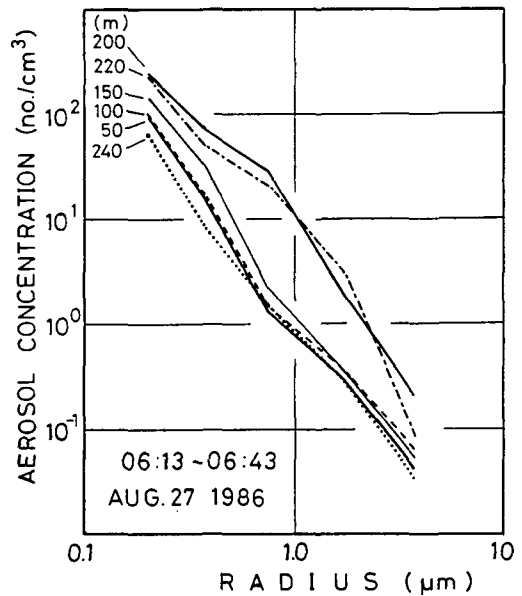


Fig. 6. Number concentrations of different size ranges at each altitude.

2. 不安定時のエアロゾル数濃度の鉛直分布

<1986年8月26日の例>

8月26日の朝は Fig. 7(a)の様に、地上付近は北北東、上層は西~北西風であり、また温度逆転の層は見られず、気層は不安定な状態を示していた。エアロゾルの数濃度は、Fig. 7(b)に示すように気球の上昇時でかなり変動している。1 µm 以下の粒径では気球の上昇時の測定では上層の

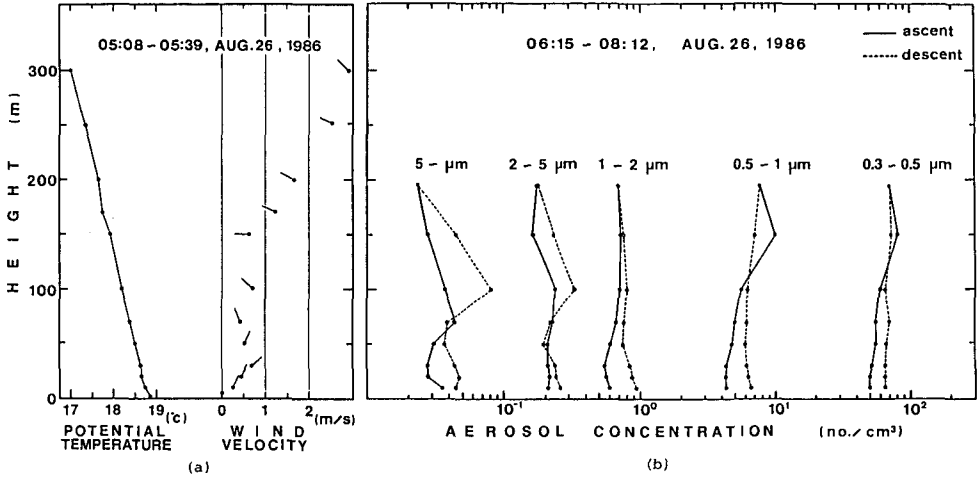


Fig. 7. Same as Fig. 4 but for August 26, 1986.

方が数濃度が高くなっているが、下降時には上下の差は小さくなっている。この様に、気層が不安定な為、気塊が上下へ移流し、濃度の時間変動がかなりあることが分かる。しかし、日の出直後で強い対流活動はまだ起こっていないので、濃度が一樣になるほどには混合されていない。

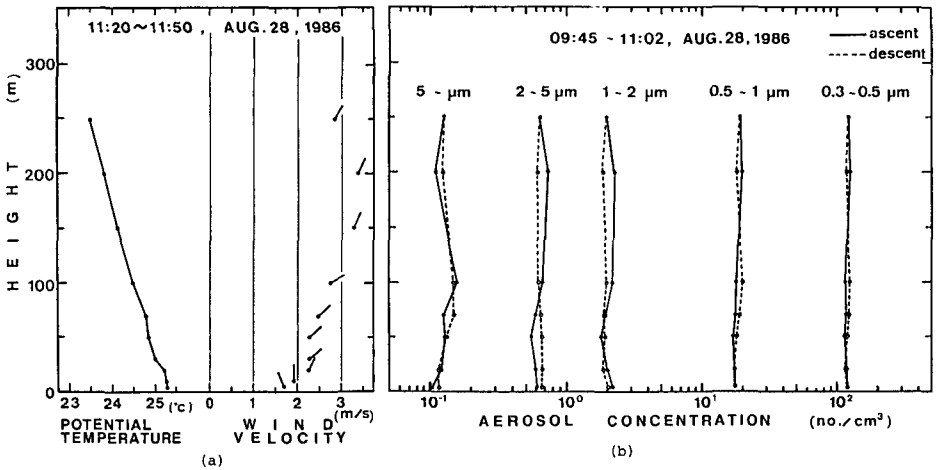


Fig. 8. Same as Fig. 4 but for August 28, 1986.

<1986年8月28日の例>

Fig. 8は地上の温位が25.3°Cであり、また上層ほど温位が減少している。また風速も他の例に比べて大きく、上下の混合が活発であったことが分かる。エアロゾル数濃度は5 µm以下の粒径で上下の差が殆ど無く、また上昇時と下降時とで時間的な変化も小さいことから、よく混合されていることがわかる。5 µm以上の粒径で100 m付近が若干増加しているのは、比較的強い風によるエアロゾル粒子のまき上げのためではないと思われる。

3. 気層の安定度とエアロゾル数濃度の鉛直分布

安定度によるエアロゾル数濃度の鉛直分布の違いを見るために、温度とエアロゾルの鉛直プロフィールが共に得られた場合について、以下の処理を行い Fig. 9(a)~(e)に粒径別に示した。横軸が隣接した2箇所の測定高度間の温度勾配、縦軸はエアロゾル数濃度のその高度間の比率である。高度 z_1 , z_2 ($z_1 > z_2$), 気温 T_1 , T_2 , 濃度 N_1 , N_2 とすると

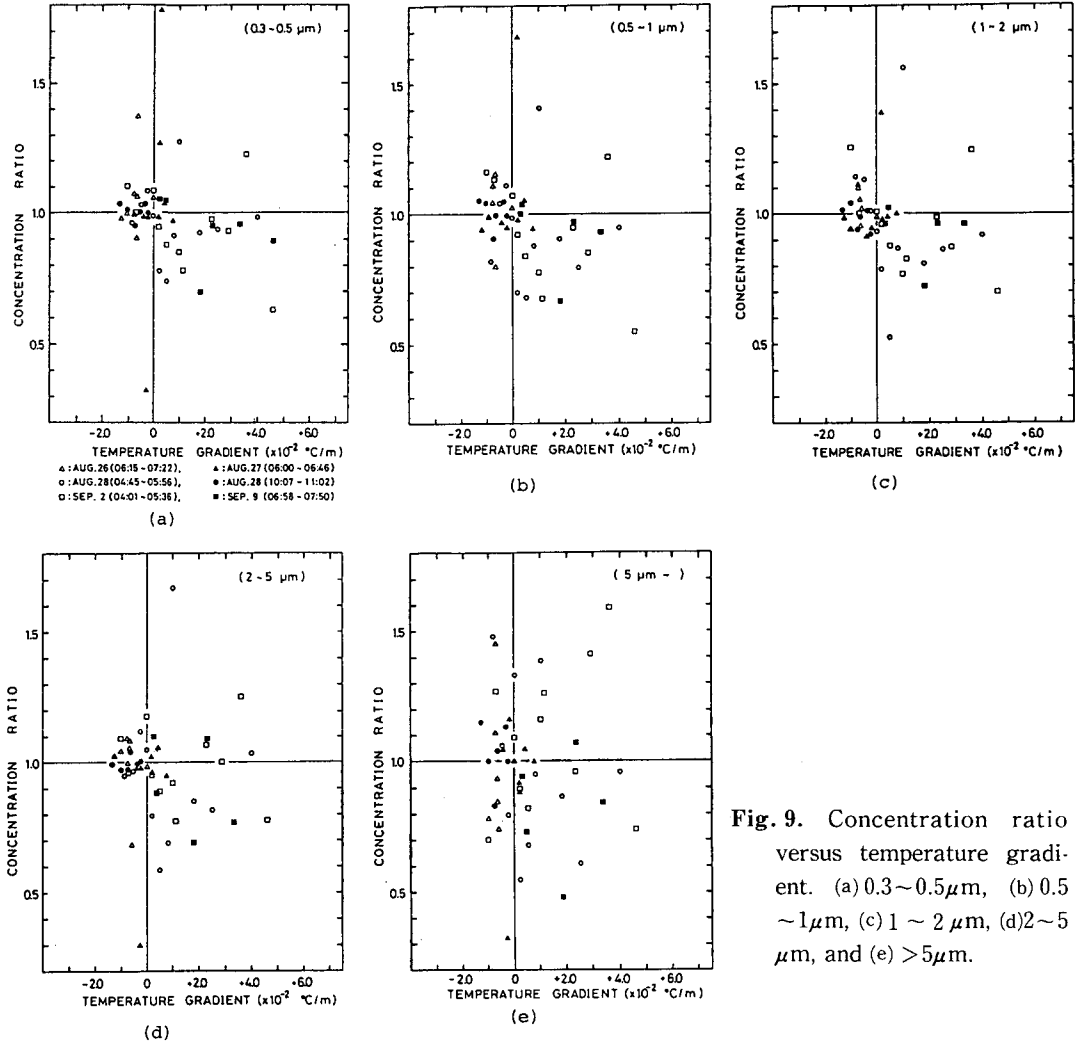


Fig. 9. Concentration ratio versus temperature gradient. (a) 0.3~0.5 μm , (b) 0.5~1 μm , (c) 1~2 μm , (d) 2~5 μm , and (e) >5 μm .

$$dT/dz = (T_2 - T_1) / (z_2 - z_1)$$

$$Ra = N_2 / N_1$$

Fig. 9の記号は、Fig. 9(a)の下に示した日時に対応する。5 μm 以下の粒径のエアロゾルでは、気層が中立から不安定な場合は、濃度比が1に近く上下の差が小さいことが分かる。これは、対流活動によって上下の混合が起こり、濃度の違う気塊が混ざりあうためである。一方、安定な場

合は、濃度比が1より小さい場所に分布しており、上層ほど濃度が小さいことになる。安定な場合は上下の拡散が抑えられるが、一般にエアロゾルの発生源は地上付近に存在しているため下層ほど濃度が高くなる。この、安定・不安定層内の濃度の鉛直プロファイルは、他の観測例とも似た傾向を示している。(Patterson et al., 1980; Alekezweeny et al., 1981; 森田ら, 1981, 1982; 三浦ら, 1983, 1985 a, b, 1986; Hayashi et al., 1985)。しかし、安定でも水平方向の移流は起こり得るし、しかも鉛直拡散を抑えるので、8月27日の例のようにある気層だけが高濃度になることもある。したがって、安定層形成時にエアロゾルの鉛直分布がどのような形になるかは、エアロゾル発生源の空間的な位置が重要となる。なお、5 μm 以上のエアロゾルのデータは、比較的散らばっているが、これは、サンプリング時間が短いためカウントした個数が少なかったためである。

V. 海風前線通過に伴うエアロゾル数濃度の変化

大気汚染物質が海風によって内陸へ輸送されることは良く知られており、日本では関東平野における輸送過程が特に多く研究されている (Fujibe et al., 1985; 栗田ら, 1987)。しかし、その土地の地形や汚染源の位置などの地域特性によって、海風の果たす役割が違ってくることが考えられる。札幌周辺の海陸風循環については、平松ら (1981, 1983) の観測があるが、エアロゾルに着目してそれらの観測が行われたことはまだあまり無い。ここでは、観測期間中に捕えられた2例の海風について、特にその前線通過前後のエアロゾル濃度の変化に着目したケーススタディを行った。

<1986年8月28日の例>

Fig. 10は、09時の地上天気図を示しているが、この日、北海道地方は日本東方海上に位置する高気圧の周辺部にあたり、比較的静穏で、高曇りの日であった。海風前線は、Fig. 11のSODARのエコーに見られる様に13時30分頃、厚さ約600mで進入して来た。地上、上空共に前線の通過を境にして気温の減少、湿度の増加、風速の増加が明瞭である (Fig. 12)。図中、実線は地上の値、一点鎖線は上層の値を示している。

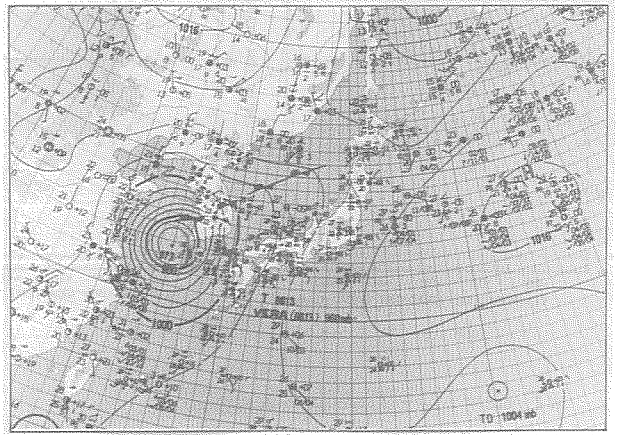


Fig. 10. Surface weather chart of 09 JST August 28, 1986. (After J. M. A.)

Fig. 13は、5つの粒径レンジ別のエアロゾル数濃度の時間変化を示したものである。実線は地上、一点鎖線はその時間に上空に係留して測定した高度150mでの値である。海風前線が矢印で

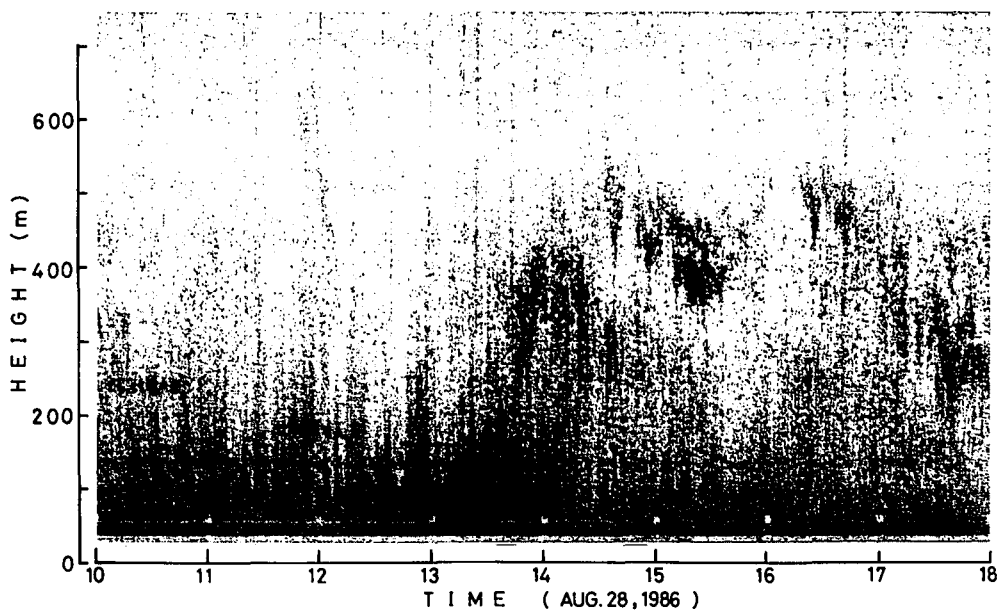


Fig. 11. Time sequence of the sodar record of August 28, 1986.

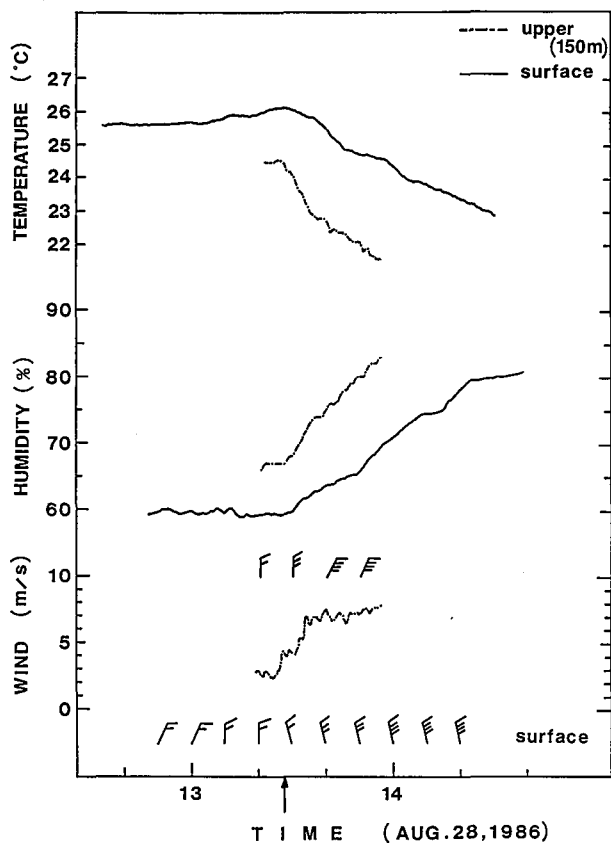


Fig. 12. Time sequences of air temperature, relative humidity and wind velocity and direction at the upper layer (150 m) and ground surface of August 28, 1986.

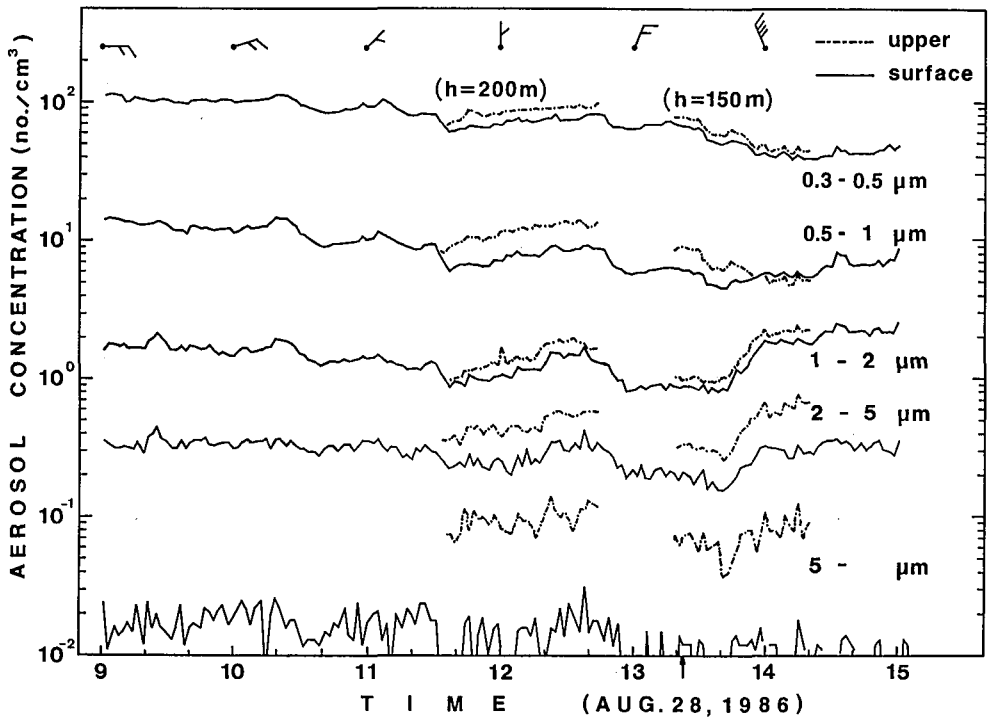


Fig. 13. Time sequences of number concentrations of aerosol particles at the upper layer and ground surface.

示した時刻に通過すると、地上、上空とも $1 \mu\text{m}$ 以下の領域で数濃度が減少するのに対して、 $1 \mu\text{m}$ 以上の領域では、増加している。ここで、エアロゾル数濃度の観測点は、北海道大学構内の一箇所のみであるのでその水平的な広がりを知ることは出来ない。しかし、サブミクロンサイズのエアロゾルは人為起源と考えるのが一般的であるので(溝畑ら, 1980), 便宜的に、札幌市が市内 9 箇所測定している汚染粒子の内、それに対応すると考えられる SO_2 濃度を利用し、その時間的変動を推定してみることにした。

Fig. 14 は、09 時、11 時、13 時、15 時の風系と SO_2 濃度の水平分布を示している。また、破線は気象要素の変化から推定した、海風前線の位置を示している。この日 09 時には石狩平野では東～東北東の風で、 SO_2 濃度 10 ppb 以上の領域が比較的広範囲に広がり、札幌市の中心部では 15 ppb 以上の部分も見られる。その後、北東風になるにしたがって高濃度の領域は市の中心部とその南西側の山手だけになっている。これは、北東風によって SO_2 濃度の高い気塊が南西側に流されたことと、風下側が弱風域になったことが原因だと考えられる。平松ら (1979) は、札幌市中心部から南西の山麓部分は周囲に比較して風が弱く、 SO_2 の濃度も高くなる傾向のあることを指摘している。海風前線が進入し北西風が変わって 1～2 時間後の 15 時には、 SO_2 濃度は大きく減少し、市の中心部でも 5 ppb 程度になっている。海風前線進入以前の風向は北東風であり、札幌では主な人為的な汚染源は、市の中心から東～北東方向に存在している。一般に都市域では特定風

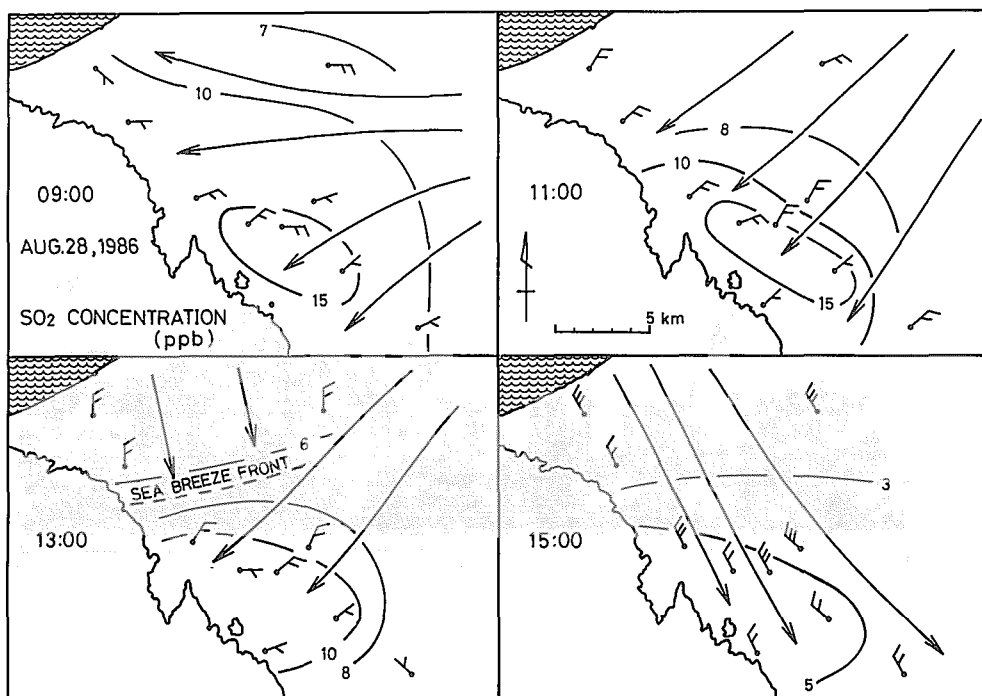


Fig. 14. Horizontal distributions of SO₂ and wind patterns of August 28, 1986.

向で濃度が高くなる傾向にあり (小林ら, 1980 ; Suda et al., 1981 ; Tanji et al., 1981 ; 下山ら, 1985), 札幌では, 北東風と、海風の北西風を比べると, 1 μm 以下のレンジで北東風の方が平均的に濃度が高い(石岡ら, 1987)。また, 1 μm 以上のエアロゾルは主に自然起源であると考えられ風向による顕著な濃度の差は無いが, 海風は海塩粒子を輸送してくるであろうし, また海風時は一般に風が強く大きいエアロゾル粒子のまき上げもかなりあるだろう。それで, このレンジでは, 北西風の方が濃度が高い。したがって, 北東風から海風の北西風へと変化した場合, Fig. 13 のように 1 μm を境にして粒径の小さい領域が減少, 大きな領域で増加というように, エアロゾル数濃度が異なった変化をするのである。

〈1986年9月2日の例〉

Fig. 15 は 09 時の地上天気図を表している。この日北海道は, 日本東方海上の高気圧の勢力圏内にあっ

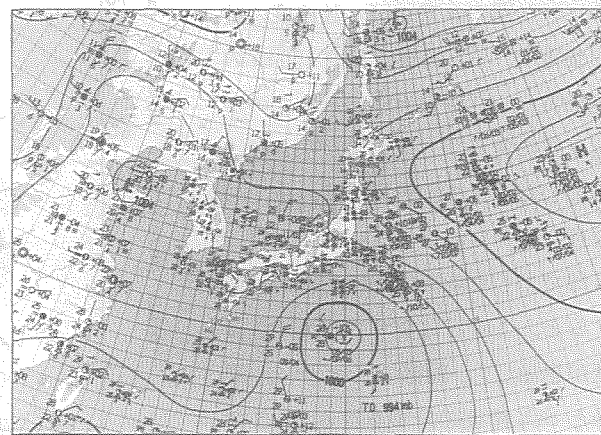


Fig. 15. Surface weather chart of 09 JST September 2, 1986. (After J. M. A.)

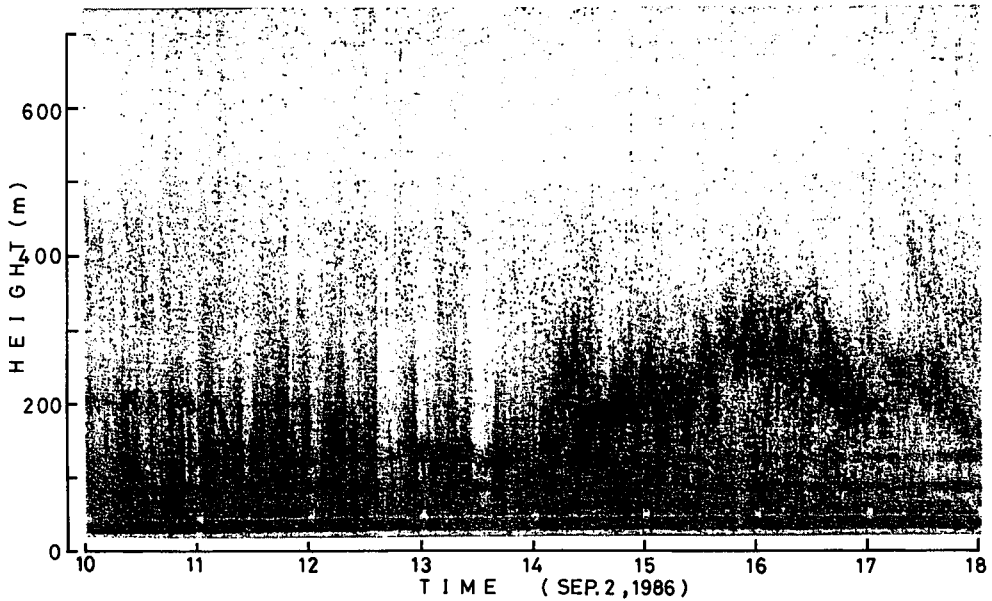


Fig. 16. Same as Fig. 11 but for September 2, 1986.

て、日中は晴天で、札幌では気温が 29.5℃まで上昇した。

SODAR の記録 (Fig. 16) では 13 時 40 分頃厚さ 500 m 前後の海風層を伴った、前線が観測地点を通過し、気象要素は Fig. 17 に示すように前の例と同様に気温の低下、湿度、風速の上昇を示した。Fig. 18 は、同様のレンジ別のエアロゾル数濃度の時間変化で、一点鎖線は高度 150 m の値である。09 時頃東風であったのが南東風に変わり、南東風が吹き続けるにしたがって、数濃度は、全ての粒径で徐々に減少している。しかし、矢印で示した時間に海風前線が通過すると、この日は全ての粒径で数濃度が増加した。同様に Fig. 19 の、風系と SO_2 濃度の分布を見ると、この日は 8 月 28 日より SO_2 濃度は低かったことが分かる。しかし前線通

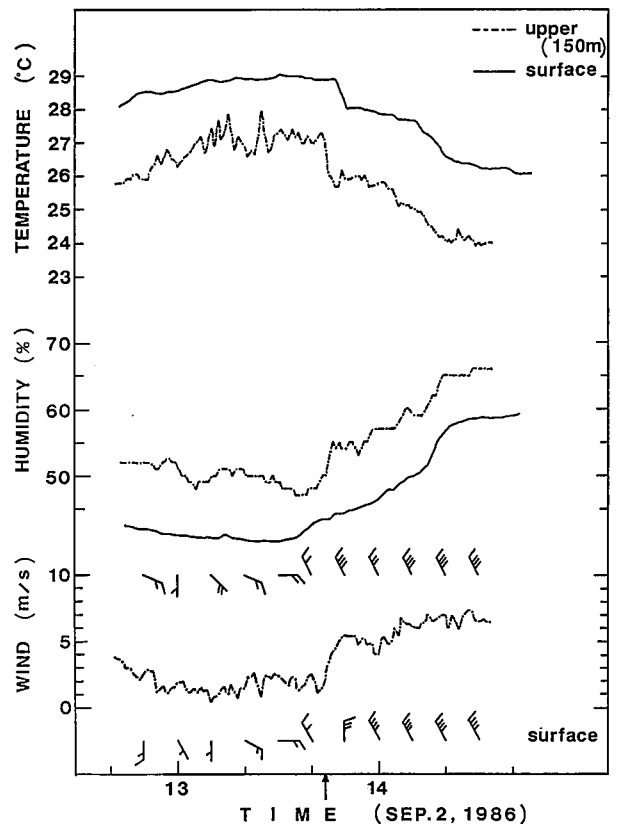


Fig. 17. Same as Fig. 12 but for September 2, 1986.

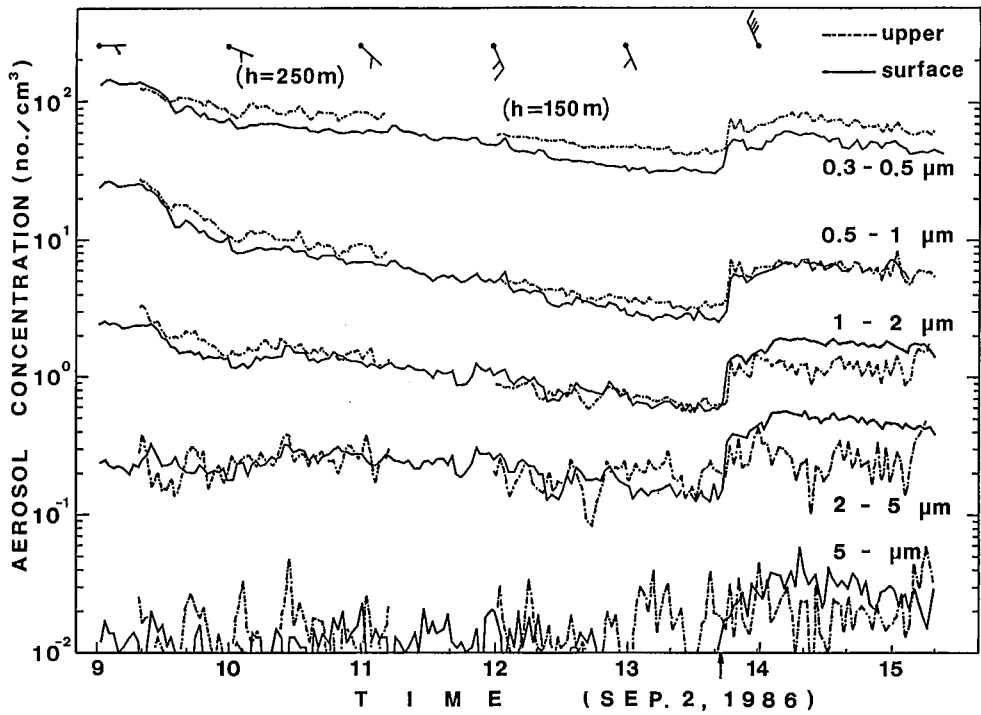


Fig. 18. Same as Fig. 13 but for September 2, 1986.

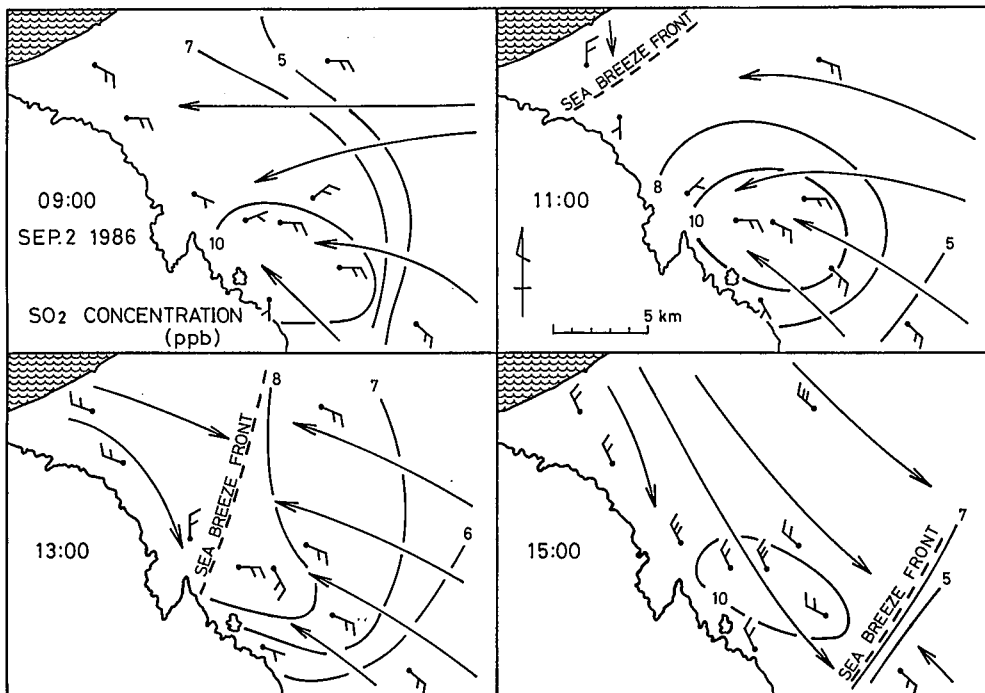


Fig. 19. Same as Fig. 14 but for September 2, 1986.

過前の風向は、8月28日が北東風であったのに対して、この日は南東風が吹いていた。SO₂濃度は南東風が吹き続けるに従って市の中心部で、7~8 ppb程度にまで減少しているが、海風の進入後は8月28日とは逆に増加して、10 ppb以上の領域も見られる。海風前線通過前の風向は南東であり、1 μm以下の粒径のエアロゾルの平均的な数濃度は、北西風と比べてもそれほど変わっていない(石岡ら, 1987)。このような変化については、次節で考察する。

〈海風によるエアロゾルの輸送モデル〉

Fig. 20は、9月2日の海風前線通過前のエアロゾルの数濃度の変化を、模式的に示したもので

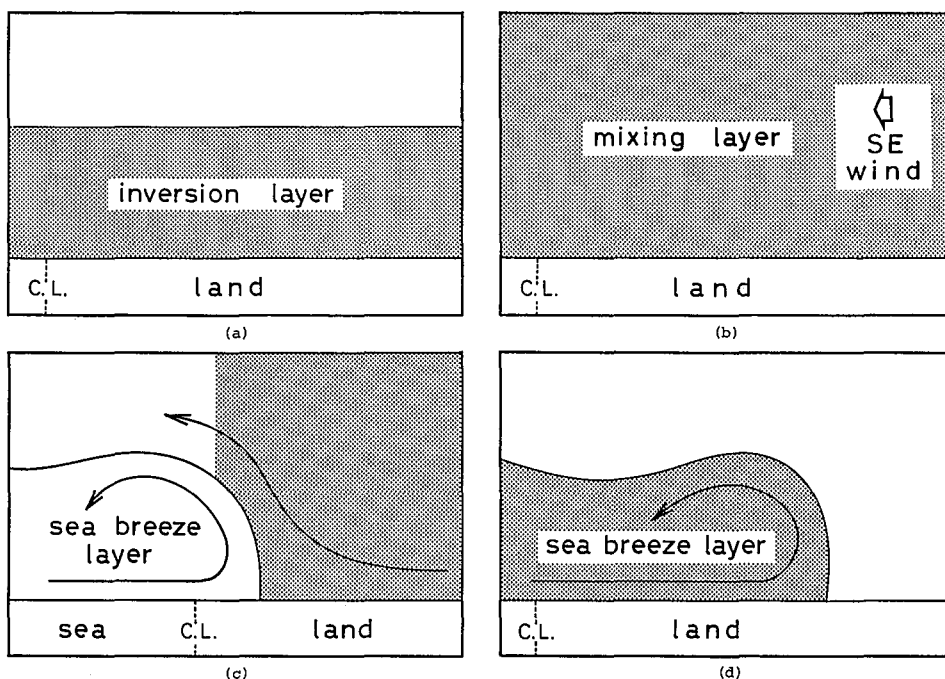


Fig. 20. Schematic model of transportation of aerosol particles.

ある。朝方、逆転層によって都市部の大気境界層下部に存在していた粒径の小さい高濃度のエアロゾルは(a)、混合層の発達により上空にまで輸送され、更に陸風である南東風によって海(北西側)の方へ流される(b)。その後南東風が吹き続けることによって、都市部の濃度は次第に減少する。一方、海風は海塩粒子を多く含むので粒径の大きなエアロゾルは濃度が高いであろうが、発生時は粒径の小さいエアロゾル粒子の濃度は小さい(c)。しかし、海岸付近(或はもっと内陸か海上)で都市域から輸送されてきた高濃度のエアロゾルに出会うと、それを内部に取り込むことにより(Ogawa et al., 1986; Nakane et al., 1986; 栗田ら, 1987)、結果として全ての粒径で濃度の高い海風に変質し、相対的に濃度の低くなっている都市部へ高濃度のエアロゾルを送り返すことになる(d)。このように、都市域で放出された汚染物質が一旦他の場所(ここでは海岸部)に輸送された後、海陸風などにより再び都市域へ吹き戻されて来ることは、McElroy et al., (1986),

Wakimoto et al., (1986) などでも報告されている。海岸部にそれほど汚染源の存在していない札幌では、ここで示した例のように、海風が大気を浄化する場合と、汚染する場合の二つの役割を果たしていることは、大変興味深い。ただし、この時期の札幌の陸風の主風向は、圧倒的に南東が多く、1で示したケースのように北東風が吹き続けることはそれほど多くはない。したがって、9月2日のような海風前線通過後に濃度の増加するケースの方がより多いのではないかと思われる。

VI. 考察とまとめ

大型係留気球に搭載した、パーティクルカウンターによるエアロゾル数濃度の鉛直分布の解析から、安定度との関係は従来の研究と一致するものであるが、目的とした粒径による違いは、それほど明瞭には見いだせなかった。本研究で対象としたエアロゾル粒子の大きさは、 $0.3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ で、実質的な粒径の測定範囲は1オーダーであり、しかもそれを5つの粒径レンジに分割して測定を行った。この程度の粒径の違いは、長期的な観測から統計的に解析を行う場合には粒径ごとの動態の差として現れるだろう。しかし、短時間にその振舞いに明確な違いが現れるほどには、各々の粒径のエアロゾル粒子の物理的特性は違わないと思われる。そのため、粒径による相違は、特に鉛直分布ではそれほど見いだすことが出来なかった。また一般に上層ほど、地上つまり人間活動の影響が小さいので、粒径による違いが現れると考えられるが、観測機器の重量が予想以上に大きく、余り上空まで測定できなかったことも、原因の一つである。今回測定した高度では、それほどドラスチックには変化しなかったことから、逆にこれくらいの高度以下の大気は、かなり一様な性質を持っているのであろう。

係留気球を用いると、ある高度で長時間連続して測定できるし、空間的にも連続して測定できる。その場の状況の変化に臨機応変に対処出来る等、他の測定法にはない長所が多々ある。今後これらの測定を行う場合には、軽量化された測器で、より上空まで、しかもエイトケン粒子など、広範囲の領域のエアロゾルを同時に測定することが必要である。またドップラーソーダー等の活用も非常に有効であると考えられる。

エアロゾル数濃度の鉛直分布は、鉛直拡散が抑制されるために安定な気層ではどの粒径でも一般に上空ほど濃度が減少した。また、上空の比較的薄い層だけ非常に濃度が高くなっているケースもあった。一方、不安定な気層では、混合のために上下の濃度差は小さかった。

海風前線通過時の $1\ \mu\text{m}$ 以下のエアロゾル数濃度の変化は、それ以前の風系に依存し、北東風であると海風前線通過後に数濃度は減少を示し、高濃度の気塊を海岸部へ輸送する南東風が続いた場合は数濃度は増加の傾向を示した。

Nakane and Sasano (1986) は、鹿島灘から筑波へ進入して来た海風をライダーを使って観測し、それから間接的に得られた海風層内のエアロゾル濃度の鉛直断面を示した。彼らは、対象としているエアロゾルの粒径については、特に言及はしていないが、フロント部分と地表近くで濃度が高くなること、また海風のヘッド部分にはヘッド前縁で上昇し、後縁で下降する閉じた循環

流があることを指摘した。この海風ヘッドの循環流については、Simpson et al., (1977) を始め何人かの研究者が指摘している。また、栗田・植田 (1987) は、海風による汚染気塊の輸送時には、ヘッド後縁の下降流によって、上空に蓄積された高濃度の汚染物質が海風層内部に取り込まれ、地上付近まで運ばれることを示した。

Fig. 21 は、1986 年 9 月 2 日のソーダーのエコーから推測した海風層と、 $1 \mu\text{m}$ 以下の粒径のアεροゾル数濃度の時間変化を表している。フロントの通過と共に数濃度は増加してピークをとった後、一旦減少している。そして、また濃度の高い状態がしばらく続いた後、徐々に減少している。Fig. 17 に一点鎖線で示した係留ゾンデで得られた上空風速も、フロントの通過と共にピークを取り、その後一時減少している。このように海風層内部でもアεροゾル数濃度にはかなりの変化があり、この減少数は、指摘されているような海風ヘッド内の循環の上昇流の部分と下降流の部分の境界に当たるのではないかと考えられる。

今後こういった、海風フロントの構造をより詳しく調べるためにも、粒径別のアεροゾル数濃度と、ドップラーソーダーなどによる海風層内部の風の 3 次元的分布の同時測定が必要である。

謝辞 この観測を行う上で、観測に協力してくれた北海道大学理学部地球物理学科気象学講座の皆様、係留気球を貸与してくれた日本気象協会北海道本部、データを提供してくれた札幌市公害部の方々に感謝いたします。

文 献

- Alekezweeny, A. J., and N. S. Laulainen, 1981. Comparison between polluted and clean air masses over Lake Michigan. *J. Appl. Met.*, **20**, 209–212.
- Endoh, T., C. Magono, T. Taniguchi, M. Murakami, and Y. Yoshida, 1982. Distributions of aerosols in vertical cross section above Sapporo. *Res. Letter Atmos. Electr.*, **2**, 5–8.
- Endow, T. and C. Magono, 1971. Distributions of aerosols in Sapporo in the winter season. *J. Met. Soc. Japan*, **49**, 48–55.
- Fujibe, F., 1985. Air pollution in the surface layer accompanying a local front at the onset of the land breeze. *J. Met. Soc. Japan*, **63**, 226–237.

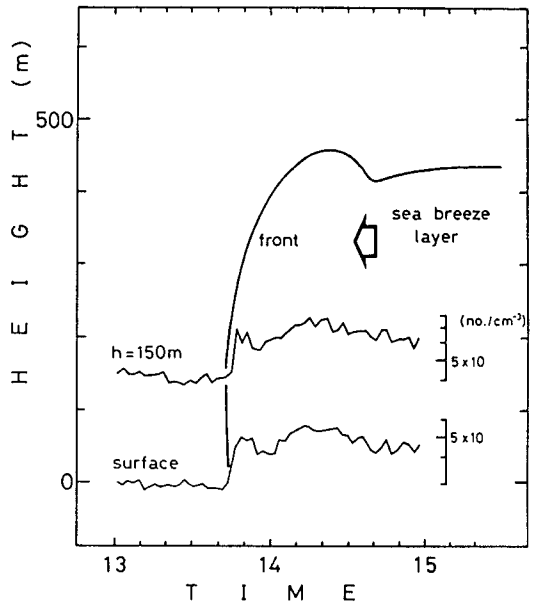


Fig. 21. Schematic model of aerosol concentration and sea breeze front.

- 藤部文昭, 浅井富雄, 1979. 関東地方における局地風に関する研究 第1部: 日変化を伴う風系の構造. *天気*, **26**, 595-604.
- Harimaya, T., T. Kobayashi, and K. Sakurai, 1981. Distributions of winter continental aerosol in the North Battleford Area, Canada. *J. Met. Soc. Japan*, **59**, 33-39.
- Hayashi, M., 1980. Acoustic sounding on the lower atmospheric inversion layer. *J. Met. Soc. Japan*, **58**, 194-202.
- Hayashi, M., O. Yokoyama, T. Mizuno and S. Yamamoto, 1984. The vertical profiles of suspending particles over urban area. *Kogai*, **19**, 349-358.
- Hayashi, M., O. Yokoyama and M. Tateki, 1985. Vertical distributions of aerosol particles in the mixing layer. *J. Met. Soc. Japan*, **63**, 491-495.
- 平松 親, 孫野長治, 1979. 札幌市の大気環境1. 大気汚染学会誌, **14**, 123-127.
- 平松 親, 孫野長治, 1979. 札幌市の大気環境(その2). 日本気象学会北海道支部だより, **24**, 58.
- 平松 親, 孫野長治, 1981. 札幌市の大気環境(その3)海風前線とヒートアイランドの関係について. 日本気象学会北海道支部だより, **26**, 48-49.
- 平松 親, 孫野長治, 菊地勝弘, 1983. 札幌市の大気環境VII-夏季の海風時における下部大気の立体構造の観測一. 日本気象学会秋期大会予稿集, **44**, 147.
- 石岡 太, 李 東仁, 菊地勝弘, 谷口 恭, 1987. 係留気球による大気境界層内のエアロゾルの測定(II). 日本気象学会秋期大会予稿集, **52**, 173.
- 菊地勝弘, 遠藤辰雄, 1975. 札幌市における冬季のエーロゾル濃度と降雪の電気電動度の測定. 北大地球物理学研究報告, **33**, 1-8.
- Kikuchi, K. and Y. Yoshida, 1987. Vertical distributions of the concentration of submicron aerosol particles near the ground surface. *J. Met. Soc. Japan*, **65**, 963-971.
- 小林哲男, 松本文利, 北川信一郎, 1980. 夏季浦和市におけるエーロゾルと風及び化学汚染物質との関係. 大気電気研究, **23**, 44-47.
- Kumar A. R., M. Purnachandra and J. S. R. Murthy, 1986. The effect of sea breezes on atmospheric stability as observed with acoustic sounder. *Boundary-Layer Meteor.*, **35**, 303-308.
- 栗田秀實, 植田洋匡, 1987. 海風時の重力流ヘッドの進行に伴う汚染気塊の輸送. 日本気象学会春期大会予稿集, **51**, 106.
- McElroy, J. L. and T. B. Smith, 1986. Vertical pollutant distributions and boundary layer structure observed by airborne lidar near the complex southern California coastline. *Atmos. Environ.*, **20**, 1555-1566.
- 三浦和彦, 関川俊男, 牧野真一, 三橋功治, 1983. 接地逆転層内におけるエーロゾル濃度について. 大気電気研究, **26**, 20.
- 三浦和彦, 関川俊男, 1985. 東京タワーで観測されたダスト濃度の垂直分布について. 大気電気研究, **28**, 42.
- 三浦和彦, 関川俊男, 1986. 大気境界層の構造とエーロゾル濃度との関係. 大気電気研究, **29**, 26.
- 三浦和彦, 下山 正, 関川俊男, 1985. 東京タワーで観測されたダスト濃度の垂直分布について(第2報). 大気電気研究, **28**, 65.
- 溝畑 朗, 真室哲雄, 1980. 境における大気浮遊流子状物質中の諸元素の発生源の同定(II). 大気汚染学会誌, **15**, 225-233.
- 森田恭弘, 高木増美, 1981. 対流圏エアロゾルの空間分布. 日本気象学会秋期大会予稿集, **40**, 170.
- 森田恭弘, 1982. 対流圏エアロゾルの垂直分布. 大気電気研究, **25**, 67.
- Nakane, H. and Y. Sasano, 1986. Structure of a sea-breeze front revealed by scanning lidar observation. *J. Met. Soc. Japan*, **64**, 787-792.
- Ogawa, Y., T. Ohara, S. Wakamatsu, P. G. Diosey, and I. Uno, 1986. Observation of lake breeze penetration and subsequent development of the thermal internal boundary layer for the Nanticoke II shoreline diffusion experiment. *Boundary-Layer Meteor.*, **35**, 207-230.
- Patterson, E. M., C. S. Kiang, A. C. Delany, A. F. Wartburg, A. C. D. Lesline, and B. J. Huebert, 1980. Global

- measurements of aerosols in remote continental and marine regions : concentrations, size distribution, and optical properties. *J. Geophys. Res.*, **85**, 7361–7376.
- Sasano, Y., A. Shigematu, H. Shimizu, S. Takeuchi and M. Okuda, 1982. On the relationship between the aerosol layer height and the mixed layer height determined by laser radar and low-level radiosonde observations. *J. Met. Soc. Japan*, **60**, 889–895.
- Simpson J. E., D. A. Mansfield,, and J. R. Milford, 1977. Inland penetration of sea-breeze fronts. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **103**, 47–76.
- 下山 正, 中尾慶一, 三浦和彦, 関川俊男, 1985. 南関東地方におけるダスト濃度と風系との関係. 大気電気研究, **28**, 66.
- Suda, T., M. Murai and N. Kitagawa, 1981. Aerosol concentrations and their behaviour during summer season at Urawa 1. Relations to wind. *Res. Letter Atmos. Electr.*, **1**, 59–62.
- Tanji, T., S. Mochizuki, M. Okino, K. Orikasa.. M. Murozumi. K. Mukaida, and M. Matsumura, 1981. Characteristics on the number density and its size distribution of Mie particle. *Res. Letter Atmos. Electr.*, **1**, 73–78.
- Tanji, T., S. Mochizuki, M. Okino, K. Orikasa, M. Murozumi, K. Mukaida, and M. Matsumura, 1982. On the aerosols in Muroran area (IV). *Res. Letter Atmos. Electr.*, **2**, 15–20.
- Wakimoto, R. M., and J. L. McElroy, 1986. Lidar observation of elevated pollution layers over Los Angeles. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1583–1599.