



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	札幌市上空の垂直断面におけるエアロゾルの分布
Author(s)	遠藤, 辰雄; 孫野, 長治; 谷口, 恭 他
Citation	環境科学 : 北海道大学大学院環境科学研究科紀要, 4(2), 197-209
Issue Date	1982-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37120
Type	departmental bulletin paper
File Information	4(2)_197-209.pdf



札幌市上空の垂直断面における エアロゾルの分布

遠藤辰雄 孫野長治 谷口 恭

村上正隆 吉田裕一

北海道大学大学院環境科学研究科気象学研究室

Distribution of Aerosols in Vertical Cross Section above Sapporo

Tatsuo Endoh, Choji Magono, Takashi Taniguchi,
Masataka Murakami and Yuichi Yoshida

Laboratory of Meteorology, Graduate school of Environmental Science,
Hokkaido University, Sapporo, Japan 060

はじめに

大気中に排出された汚染物質は、一次粒子や気体から転換される二次粒子を含めて、結局サブミクロンエアロゾルの形であることが多い。それらの存在時間は長く、しかも光学的に検知できない程粒径が小さいため、都市上空では、それらが多数あるにもかかわらず、一見青空であることが多い。

このエアロゾルの分布の様子を立体的に求めるため、孫野・遠藤 (1979) は、これまで航空機観測により、Fig. 1 のループ状のコースに沿って水平断面内の分布を三層にわたって求めて来た。ところが、これから求めた垂直断面内の分布図においては、測定時間の差が大き過ぎて、その分布の変形がおこると考えられ、信頼性が低いという問題があった。ここでは、測定時間の差を少なくして垂直断面分布を求めることを主眼として観測を行った。

一方、Endow and Magono (1971) は、冬期間の札幌市内を東西南北によぎる、地上におけるエアロゾルの水平分布の測定を車を用いて行った。その中では、さらにロープウェイを利用して、地上から約 400 m 上空までのエアロゾルの垂直分布も求めた例がある。その結果、午前中の接地逆転層の解消する直前の分布は、上下の差が大きく、地上は 10^5 個/cc であるのに対し 400 m 上空では 10^3 個/cc と約 2 桁の差があった。また一方、降雪があるときには、上下の濃度差が小さくなり、地上も上空も共に 10^4 個/cc の濃度であった。

エアロゾルの発生から消滅までの過程を調べることは、全球的な大気環境の将来を予測する上で重要なことである。ここでは、それら一連の過程を構成する要素の一つとして、発生の形態の典型的な例として、都市上空のエアロゾルの分布にみる発生源の構造を調べることを第一の目的とした。外国における同様な研究の例として Shea and Auer (1978) のものなどがあげられる。

ここでは比較的、時間的かつ空間的に対応のよい、気温とエアロゾル濃度の分布の測定が同時に行なわれ

たので、その観測結果が、都市の大気環境に関する総合的な今後の議論に寄与する資料になると考えて、観測結果を主とし、それに試験的な解析と考察を加えて報告する。

観 測 方 法

上空の観測は、セスナ機を用い、また地上の観測は乗用車を用いて行った。エアロゾル濃度の測定にはガードナカカウンターを、また気温の測定にはサーミスタ温度計を、夫々同型のものを二台準備して、セスナ機と乗用車に一組ずつ搭載した。ただし、上空のエアロゾルの濃度は、地上より2~3桁低いことが多く、通常のガードナカカウンターでは検出不可能なことがあるので、Hogan *et al.* (1975) によって低濃度用に改良された測器を加えて、平行して測定した。

Fig. 2 の A は、使用したセスナ機を示す。エアロゾルを測定する空気のと入れ口は、正面左側下部にみられるエンジンの排気の影響をさけるため、主翼右側のつけ根にある機内換気のと入れ口にとりつけた。B は機内の様子を示し、副操縦士席では予め決めたコースの飛行の確認と通過時刻及び高度を記録し、後部座席では、二台のガードナカカウンターとサーミスタ温度計をおき、これらを 30~60 秒の間隔で操作し、測定して、時刻を秒の単位で記録した。一方地上の観測は C に示すように乗用車の屋根の上で地上より 2 m の高さに、エアロゾルのとり入れ口と、サーミスタ温度計の感部を固定した。感部での放射の影響をさけるため、シェルターをとりつけた。運転者は位置と距離を読み上げ、後部席の測定者は、これとエアロゾル濃度と気温及び時刻をテープレコーダに音声で記録した。

観測時間中の風の垂直の微細構造を得るため、札幌管区気象台の高層課がルーチンで上げるラジオゾンデを、約 1.5 km 離れた北大理学部三号館屋上にとりつけた 1680 MHz のレーウィンゾンデの受信装置で自動追尾し、ゾンデの方位角、高度角を記録し、これと管区の追尾の記録と併せて三角法によりゾンデの位置の時間変化を求めた。その際、管区気象台の追尾記録を通常の 1 分毎よりは速めて 6 秒毎にとり、しかも飛揚を 0830 分の秒単位の正時に行うなど特別な協力をいただいた。

観測は、ゾンデ飛揚を含む時間帯をねらって 0800~0900 と 0900~1000 に夫々、Fig. 1 の南北及び東西のコースに沿って行った。

D は管区気象台から上げたラジオゾンデの気球を北大側から望遠レンズでとらえたものであり、図の左中央の白丸が気球である。観測コースは、札幌市の中心を通り互いに直交する二組のコースを予定し、観測予定当日の朝 6 時にパイボールをとばしてから、コースを決定した。

観測は 1980 年 4 月 23 日と 25 日の二回行い、いずれも午前中であった。選ばれた観測コースは、結局、

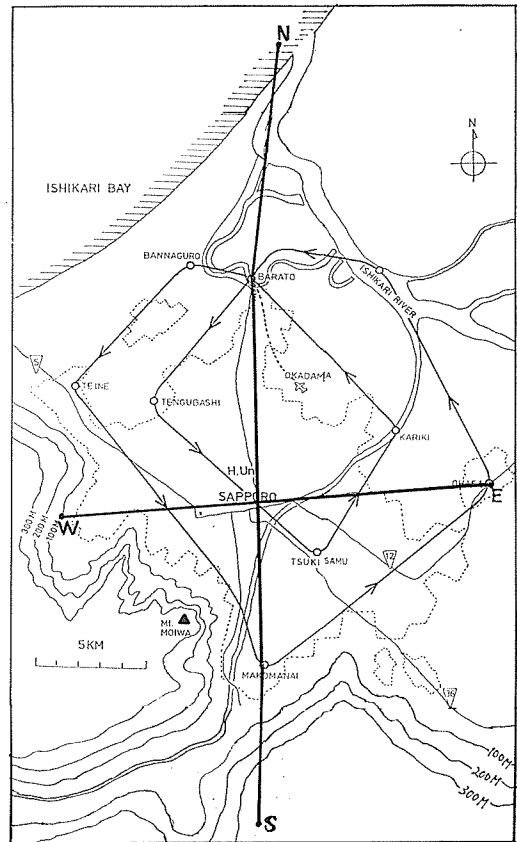


Fig. 1. Flight courses of measurements. Two crossed straight courses were used in the present work.

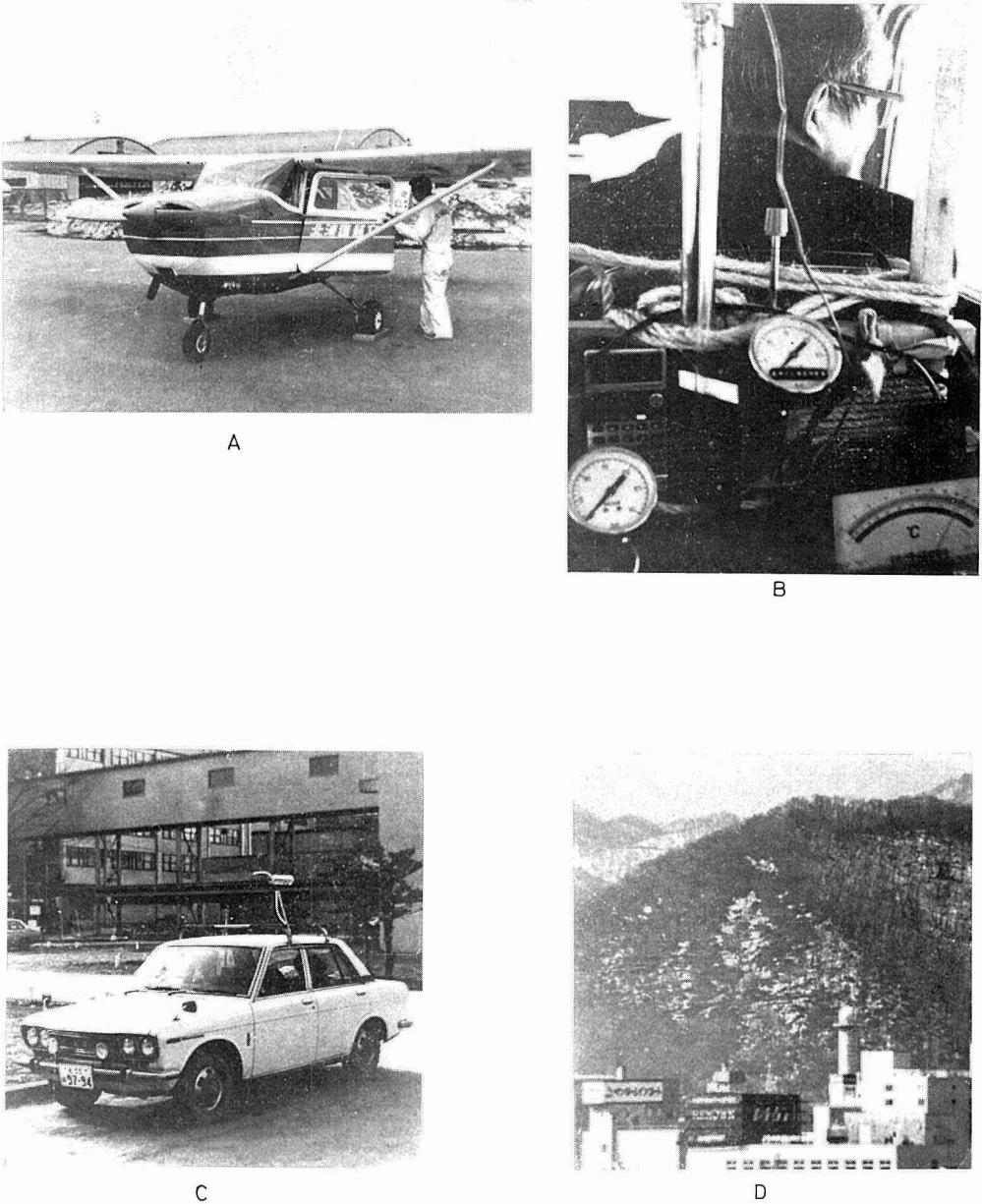


Fig. 2. A: The aircraft used. An inlet pipe of air sampling was mounted at the left neck of main wings, while an exhaust pipe of the engine was set at the right lower part of head. B: Instruments set in the rear seats of cockpit. A common and a high sensitive Gardner counter, a thermister-thermometer and a digital clock. C: The car used in ground level observation with same types of instruments as upper level observation. D: The routine balloon (white circle at left middle of the picture) launched from Sapporo Meteorological Observatory.

Fig. 1 に示す東西南北の方のコースとなった。飛行機ははじめ南北コースの高度 300 m を北から侵入して南で 600 m へ上り、つづいて 900 m, 1,200 m の順で水平飛行を行い、つぎに東西コースの高度 1,200 m を東からはじめて高度 300 m まで順に水平飛行をくり返して降り東にぬけて終了する経路で観測を行った。

観 測 結 果

観測した日は Fig. 3 に示すように、弱い西風の晴れの天気の日であった。札幌の周辺にはわずかに晴天積雲がみられた。

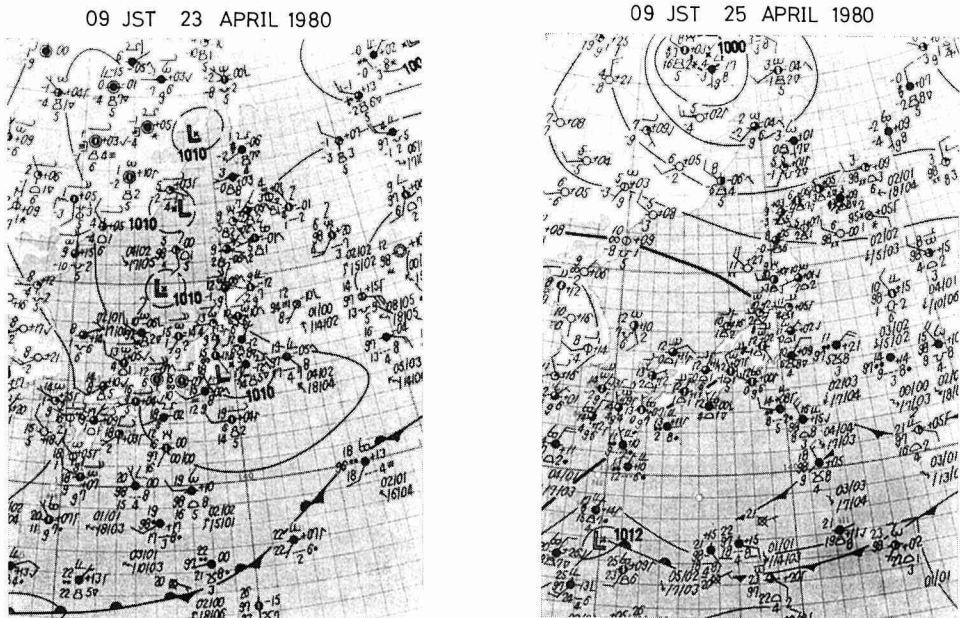


Fig. 3. Surface weather chart. 0900 JST 23, 25 April 1980.

Figs. 4, 5 には夫々 23 日と 25 日の測定値を示してある。図の左と右が夫々の日の南北と東西のコースに沿ったものである。図の横軸は、コースに沿った位置を示し、縦には下から順に、地上、高度 300 m, 600 m, 900 m, 1,200 m での測定値であり、実線はエアロゾルの数濃度を示し、その値は右の縦軸に示されている。また破線は気温を示し、基線の温度が右端に示してある。また 1°C の温度幅は 300 m 図の右端に示すとおりである。夫々の折線の折点が測定値を示す。これに対して、地上の測定点の数は多く、×印はコースである幹線道路上での測定値を、また○印は仲小路へ意識的に入って測定したものである。これらの地上におけるエアロゾルの測定値は変動幅が大きい、それらの最小値をつらねたのが図の実線の折線である。

すべてのエアロゾル分布図では周辺部に比べ中心部で高くなっているのがみられ、それは下層ほど顕著である。気温分布は、600 m 以下では中心部がいつも高いが、それより上では、中心部がむしろ低い場合もみられる。図の上空の基線上の丸印は飛行機が強い動揺を感じた位置を示している。

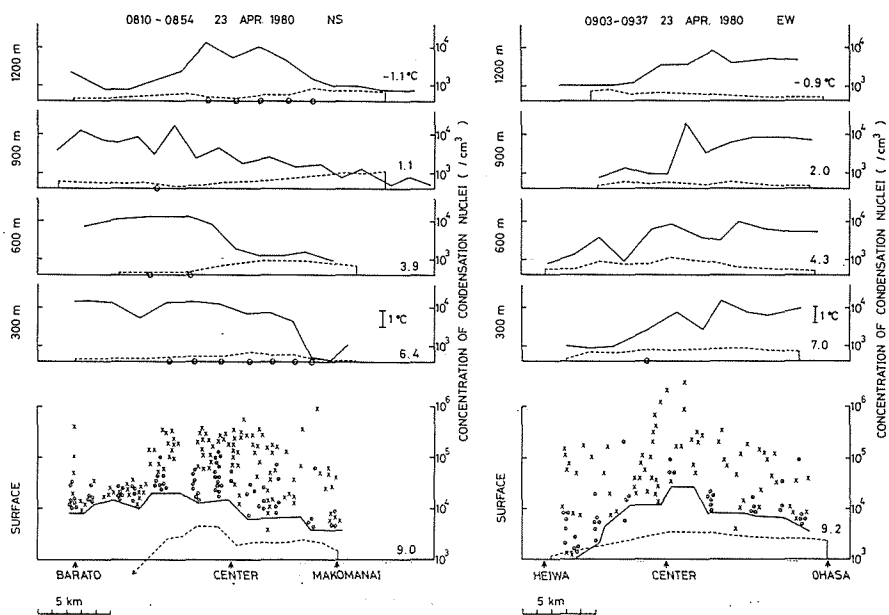


Fig. 4. Observed values of number concentration of condensation nuclei (solid lines) and temperature (broken lines) at the surface and four levels aloft along the course NS (left) and EW (right) in Fig. 1. on 23 April 1980.

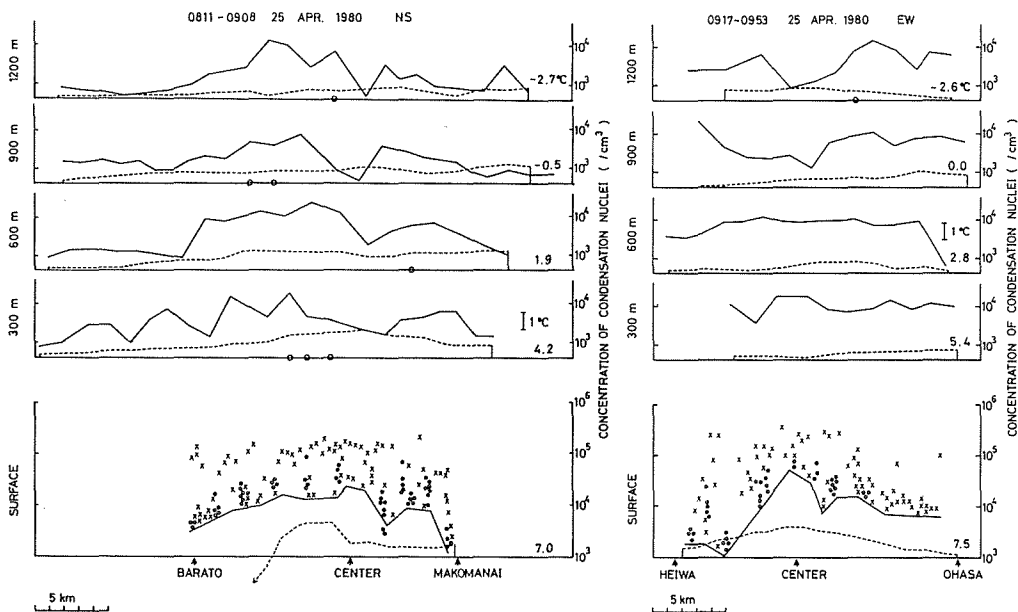


Fig. 5. Same as Fig. 4. except on 25 April 1980.

Fig. 6 は札幌管区気象台高層課が定時に飛揚したラジオゾンデを二点から追尾して求めた下層風の微細構造で左から風向、風速及び気球の上昇速度である。これらは6秒毎の値から計算したもので三点移動平均を行っている。さらに上層での値から外挿して求めたゾンデの平均上昇速度を、右端の図に破線で示し、それは5 m/sec の値である。したがって、この値からの差し引きが、その高度における気球のまわりの大気の運動の垂直成分を示すとみることができる。図によると最大上昇気流が3.5 m/sec に及んでいることを示している。

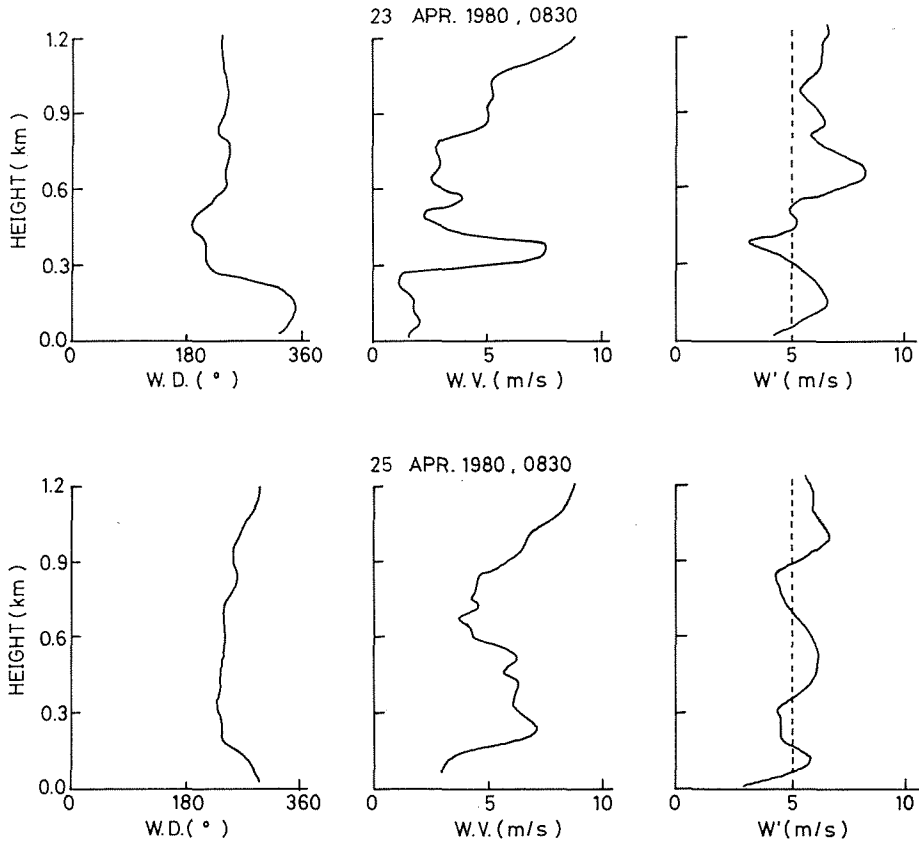


Fig. 6. Fine structures of vertical wind profile in the atmospheric boundary layer. 0830 JST 23, 25 April 1980. WD: wind direction, WV: horizontal wind speed, W': vertical components of ascending velocities of radio-sondes and mean values (broken line).

解 析

測定された、上空でのエアロゾルの濃度値と地上の濃度の最小値とを組み合わせ、これらの垂直断面内の分布を等値線で示したのが Figs. 7, 8 である。等値線につけられた数値を 1,000 倍した値が 1 cc 当りのエアロゾルの個数である。等値線は 2 倍ずつの等比級数的に示してある。これらの図には Figs. 4, 5 と同じく気温分布を入れてある。また丸印は飛行機が上下に強くゆれた位置を示している。また図の中央部の斜線はラジオゾンデの飛跡を示したもので、夫々の断面内での成分によりゾンデの飛跡の前傾がみられる。一般に西風が卓越しており、東西断面図内での前傾がみとめられる。

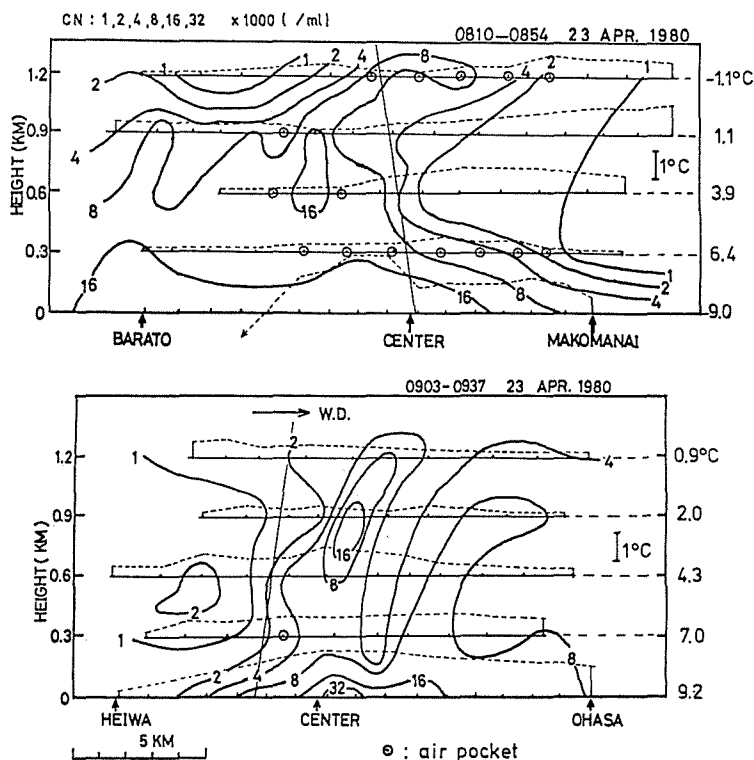


Fig. 7. Vertical cross-section of aerosol concentration and horizontal changes of temperature on five constant levels on 23 April 1980, Upper: NS section, Lower: EW section.

市街地の中心部から高濃度のエロゾルの分布が上空にのび、それが風に沿って前傾しているのがわかる。またこれらの軸と平行に上空の清浄な気塊が地表のすぐ上までつらなって分布しているのが注目される。さらに中心部から上にのびる高濃度のコアの中心又は上部に、高濃度の領域が地上と分離してみられるのが注目される。

これらの気温分布を温位にして 0.1°K 毎の等温位線で示したものが Figs. 9, 10 である。図の数値に 280°K を加えたものがその温位の値である。温位は一般に上ほど高く、下ほど低い値で分布しているのがみられ、全体的にやや不安定な成層であることがわかる。ところが 300 m 以下と地上との間では温位の逆転があることになり、超断熱的で極めて不安定になっているのがわかる。これが地面から放出される熱によるもので、上空への対流の推進力となるものとみなすことができる。ほぼ $300\sim 600\text{ m}$ までの等温位線は市の中心部ほど下に向かって垂れ下っているのがみられる。一方 600 m より上では、市の中心部の上空では、等温位線が上に向かって盛りあがっているか、または複雑に波うっているのがよくみられる。

特に東西断面にみられる中心部から上方へのびているエロゾルの高濃度のコアについてみると、コアの下半分では等温位線が下に垂れ下り、上部では上にもり上っているのが Figs. 9, 10 の双方でみることができる。このコアの軸に沿ってコアの中心と周囲の温位の差を高さに対してプロットしたのが Fig. 11 である。図の左の 23 日の例では 600 m より上で、また 25 日の例では 900 m より上で夫々コアの中心の温位の方が周囲に比べて低くなっている、いわゆるクロスオーバの現象がみられる。この下半分は、いまだに浮力があるが、クロスオーバ点より上部では、持上げられ過ぎて負の浮力となっていることになる。これらのプロフィール

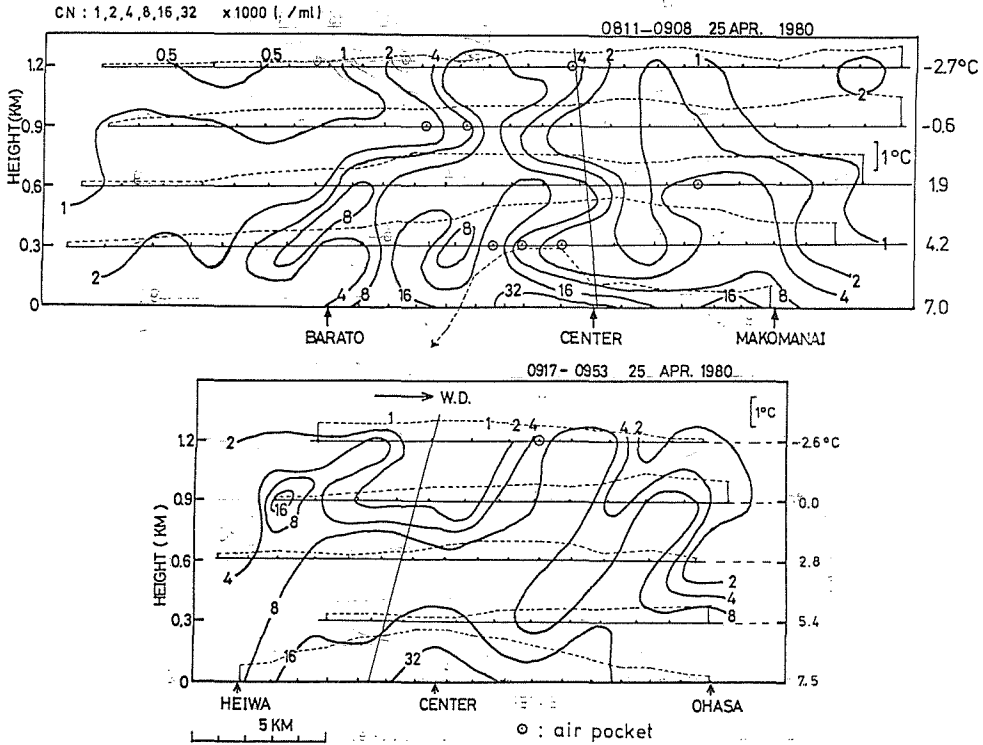


Fig. 8. Same as Fig. 7. except on 25 April 1980.

は Bornstein (1968) や木村ら (1975) のものとよく似ている。

Figs. 9, 10 の東西断面は、ほぼ風の方角に沿っていて、いずれの図でもラジオゾンデの飛跡が西風により東へ傾斜しているのがみられる。また市の中心部から上るエアロゾルの高濃度のコアもこれと同様に前傾しているのがみられる。ラジオゾンデの上昇速度は平均 5 m/sec とわかっているの、これらのコアの傾斜角度をゾンデのそれと比べることによってコアの上昇速度を推算することが出来る。それらは Fig. 12 に示され、23 日の図では 0.4, 1.3, 1.8 m/sec の上昇速度が、また 25 日の図からは 1.3, 1.8, 3.5 m/sec の値が計算された。これらは、Fig. 6 に示されてるゾンデによる上昇気流の速度の値の範囲内に含まれていることがわかる。

一方 23 日と 25 日の南北断面の測定時刻は夫々、0810~0854 と 0811~0908 であり、ラジオゾンデはいつも 0830 に飛揚され、しかもその位置は市の中心部に含まれている。したがって時間的にも空間的にも、極めて近い関係の測定値として対応をみることができる。そこで、この大気の垂直速度の分布とエアロゾルの濃度分布の図を照合してみた。それが Fig. 13 である。図のゾンデの飛跡を示す傾線の左側と右側に下降速度と上昇速度が夫々示されている。エアロゾル濃度の分布で 4×10^3 個/cc の等値線を、市の中心部からのびる高濃度のコアの内側と外側の境界とみなすと、ゾンデがコアの内側にあるときは上昇流の場であり、外側にあるとき下降流の場に夫々、ほぼ対応しているのがみられる。これは Fig. 13 の下の図において特によい一致がみられるが、上の図においても同様にこの関係が満足されている。この 4×10^3 個/cc の値は、これまでの地上において観測してきた多数の測定値からみて郊外の清浄な空気と市内の汚染空気の濃度の境界値としてあげるときこの値は不自然なものではない。

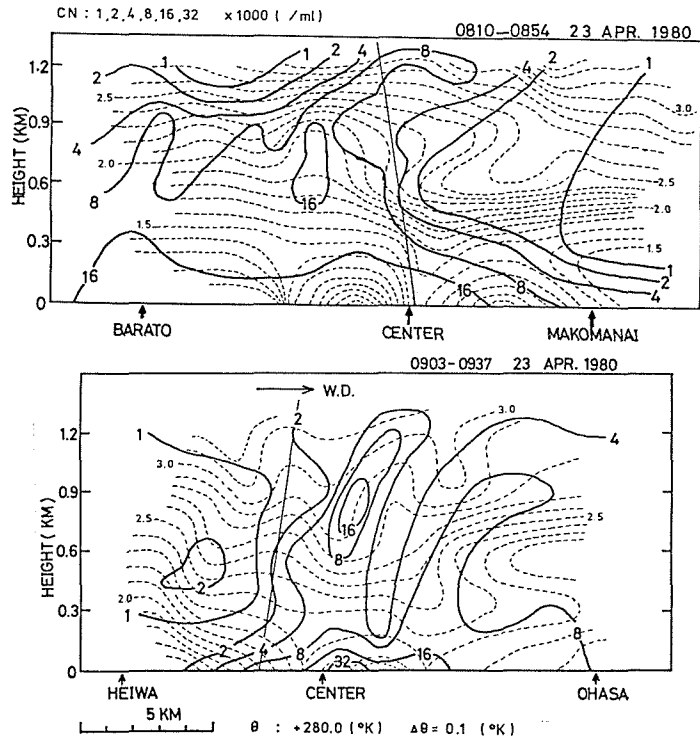


Fig. 9. Vertical cross-section of aerosol concentration and potential temperature on 23 April 1980, Upper and Lower: SN and EW section respectively.

考 察

観測結果の Figs. 4, 5 にみられるように、上空と地上のエアロゾルの濃度とその測定数を比べると、地上の方が数多く測られ、その値の変動幅が3~4桁にまで及ぶほど大きい。したがって、これらを直接結びつけることはむずかしく、また不自然である。幹線道路上での値は大きく、仲小路では値が低くなっているのがわかる。これらのうちで最も低い濃度値の清浄空気は、市の中心部では、水平に移動してくるよりは、すぐ上の空気が地上に入り込んでくるためとみる方が自然である。したがって、これら地上の値と上空の値を比べるとき、地上の建造物の平均の高さ10~20 mをこえる高さの空気中のエアロゾルの値とつなぐことが自然でありその値は、地上で測定される最小値に相当すると考えることができる。したがって Figs. 7~10 のエアロゾルの垂直断面図では地上値の最小のものと上空の値をつないで描いた。

各垂直断面図は34~57分ほどの測定時間を要しており、上下に隣接するものでも7分ほどの時間差がある。この間に大気は上下又は水平に動くはずであるが、空気が動いてもエアロゾルの濃度の分布は定常的に動かず空間座標に固定されている長周期の成分があると考え、その上に多少の微細な短周期の成分がのっていると考えてみた。この仮定にもとづいて時間補正を一切しないで描いたものが Figs. 7~10 である。観測された両日は、Fig. 3 にみられるように、ほとんど同様な気象条件下のものであり、しかも双方とも午前中の同じ時間帯のものであった。得られた分布図は、細かいところを除けば、ほぼ同様なものであるとみることができる。したがって、先の仮定は現実的なものであると考えることができる。

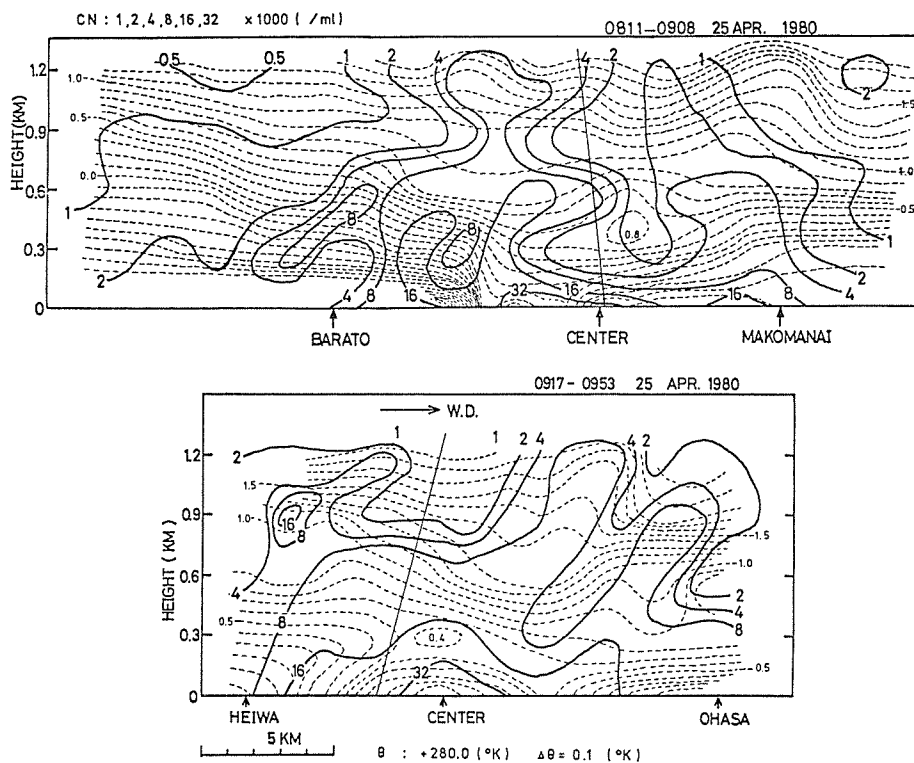


Fig. 10. Same as Fig. 9. except on 25 April 1980.

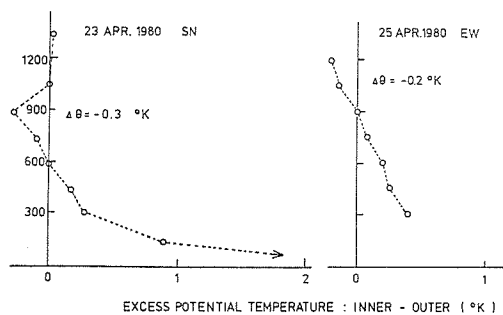


Fig. 11. Cross-over effect.

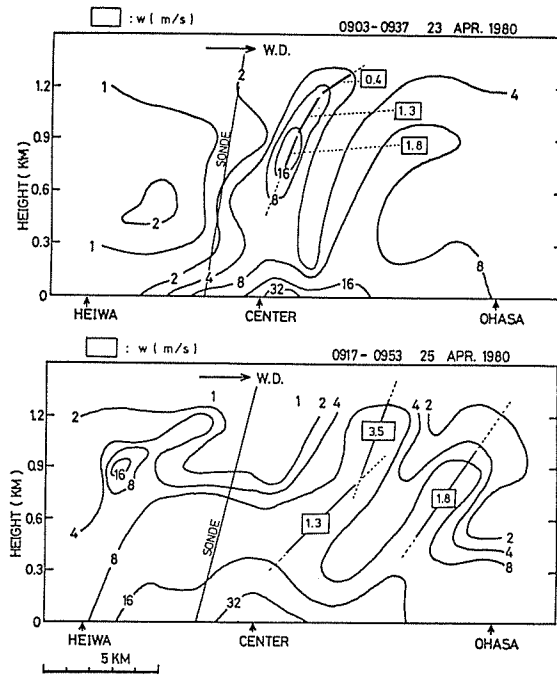


Fig. 12. Updraft velocities along the axes of polluted air plumes.

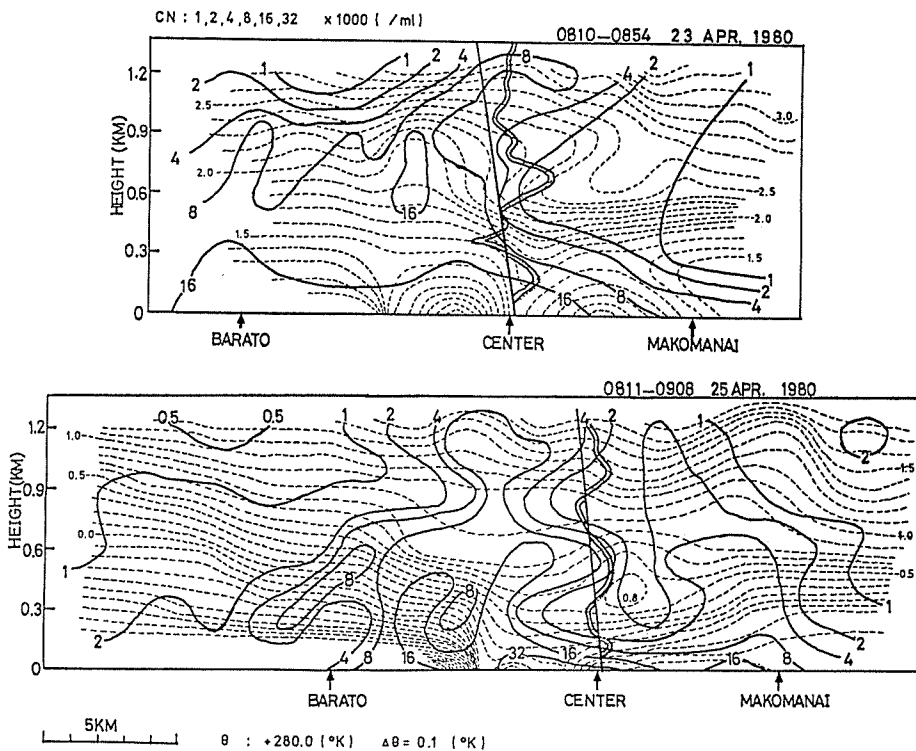


Fig. 13. Correlation between vertical air motion and distribution of aerosol concentration.

これら両図に共通にみられることは、市の中心部の上空に、この時刻ではエーロゾルの高濃度のプリュームが常にみられ、それが風によって前傾しながら上昇している様子がみられる。またこのプリュームに沿ってクロスオーバの効果がみられた。さらに 300 m 以下の大気は超断熱的であった。またこのプリュームと平行して上層の清浄な空気が地上まで貫入しているのが両日ともその風下側にみられた。しかもラジオゾンデの記録から、このプリュームが上昇流であり、上からの清浄な空気は下降流であることが確認され、後者は対流の補償流となっていることが推定される。この上下流の境界として 4×10^3 個/cc のエーロゾルの等値線が提案されたが、Figs. 7, 8 にみられるエアポケットのような飛行機のゆれはこの等値線と飛行路が交叉するところで多くみられていることは、この上下流の境界であることの証拠とみられる。

この補償流が上から下ってくるとすれば、図にみられるように軸が後傾することを説明することはむずかしい。したがってヒートアイランドが定常的にプリュームの形をつくってそれが剛体的な性質を示す結果、その周囲にできる一般流のまき込みの効果もあると考える方が説明しやすい。この下降流は両日とも同じ位置にみられるが、その根元は豊平川とその広大な河川敷及び周辺の公園地帯に対応していて、これが周囲の熱源に比べ相対的にヒートシンクとなっていて、これが上述の機構を強める要因となっていると考えると、これらの現象を説明することができる。

ま と め

札幌市上空のエーロゾルと気温の垂直断面分布を調べたところ、2 回の観測は共に上下の混合のおこりやすい、やや不安定な大気成層の時であったが、それらに共通してつぎのことがわかった。

- (1) 市の中心部には定常的に高濃度のエーロゾルの分布がみられ、それらは 2~3 m/sec の上昇流によって 1,200 m までも持ち上げられていた。
- (2) そのなかには下層より上の方が高濃度になって地上から分離している塊状の分布がみられた。
- (3) これらの汚染大気のプリュームは、周囲の風によって前傾しているのがみられた。
- (4) これらの上昇流の立ち上るつけ根のすぐ風下側に上空からの清浄な大気の下降流が貫入し、地表近くまで達しているのがみられた。
- (5) 600 m 以下ではヒートアイランドが定常的に存在し、中心部の下層は超断熱的で対流の推力となると考えられる。
- (6) 600 m より上空では中心部上空では周囲より気温が低いこともあり、特に上昇流の頂部では直径 3~4 km の局所的なクロスオーバ現象がみられた。

謝 辞

札幌市上空の風の微細構造を調べるために、札幌管区気象台高層課の気球観測の発信電波を傍受させていただき、さらに時刻等の記録において通常以外の御協力をいただいたことに対し、同気象台の矢崎敬三台長、岡村 存技術部長及び大塚今朝信高層課長はじめとする高層課の多くの方々に、筆者らは心からの謝意を表す。

この観測の費用の大部分は、文部省科学研究費補助金環境科学特別研究、課題番号 403002 によって行われた。代表者の北大工学部の大喜多敏一教授の御指導と御援助に心からの謝意を表すものである。

文 献

- Bornstein, R. D. (1968): Observations of the urban heat island effect in New York City. J. Appl. Meteor., 7, 575-582.

- Endow, T. and C. Magono (1971): Distributions of aerosols in Sapporo in the winter season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **49**, 48-55.
- Hogan, A. W., W. Winters and G. Gardner (1975): A Portable Aerosol Detector of High Sensitivity. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 39-45.
- 木村竜治・三沢信彦・坂上治郎・国井治郎 (1975): 都市のヒートアイランド効果に伴う対流の特性について. *天気*, **22**, 186-196.
- 孫野長治・遠藤辰雄 (1979): 札幌市上空のエアロゾル分布の三次元観測. *日本気象学会講演予稿集*, **36**, p. 148.
- Shea, D. M. and A. H. Auer, Jr. (1978): Thermodynamic properties and aerosol patterns in the plume downwind of St. Louis. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 689-698.

Summary

The vertical cross sections of the aerosol concentration and the temperature were studied over the Sapporo City in April 1980. The results in the present study are summarized as follows.

The aerosol concentration was stationarily high over the central part of the city. And the polluted air in the central part was wafted up to the altituded of 1,200 m by the updrafts of 2 to 3 m/sec. The axes of these updrafts were found to be declined leeward by the environmental wind. To the leeward of these updrafts a compensating current, which consisted of upper clean air and penetrated downward along the axes of the updrafts, were always found. The tongue tip of such a clean air almost reached just above the ground surface.

The temperature in the central part of the city was higher than that in the suburban part and a remarkable heat island was formed. The effect of heat island reached the altitude of 600 m. Above this altitude the temperature distribution became irregular in the central part of the city. A cross-over effect was found on the top of the updraft and the temperature in the updraft was lower than that in the environmental air. In most parts of the atmosphere measured, the potential temperature increased with the altitude. However an inversion of potential temperature was found near the surface of the central part and this superadiabatic stratification was considered as the driving force of the convection.