

大気汚染の気象学



箕輪年雄

大気汚染質は、その密度、粒子の大きさ、化学的な性状によって空気中に滞留する時間が異なるけれども、空中にただよっているあいだは、空気といっしょになって流動拡散するものである。それゆえ空気の運動の状態を調べれば、大気汚染質のふるまいもわかることになる。

大気は、大小多くのうずがいきまじって流れている。このうずは生成消滅をくりかえしているが、その過程において空気の混合がおこなわれ、それともなって空気中の汚染質の拡散がおこるわけである。このうずによる拡散は分子拡散よりもはるかに大きくて、乱流拡散といわれる。乱流拡散の大きさは、汚染濃度の勾配にある比例係数を乗じたものであらわされるが、この係数を拡散係数という。拡散係数は、したがって拡散の大きさをきめるものであって、これは地面状態や気象条件によっていろいろな値をとる。

大気汚染を防止するには、二つの方法が考えられる。第1は汚染質の放出を制限することであり、第2は放出された汚染質をなるべく多量の空気とまぜあわせて、その濃度を下げることである。拡散係数が気象条件に関係しているので、第2の方法を効果的におこなうには気象条件調査が必須となる。根岸・本牧地区をはじめ、あらたに工場が建設される地域で気象調査がおこなわれているのは、このためである。

まず、わで国で最近とくに問題となっている亜硫酸ガスについて考えてみよう。亜硫酸ガス汚染は重油の燃焼によっておこる割合が、もっとも大きいとされているが、わが国で使用している重油はとくに硫黄分が多くなっている。それゆえ低硫黄重油を使用すれば、大気中の亜硫酸ガス濃度を何分の一かに低下させることが可能である。常時このような重油を使用することは経済的に無理があ

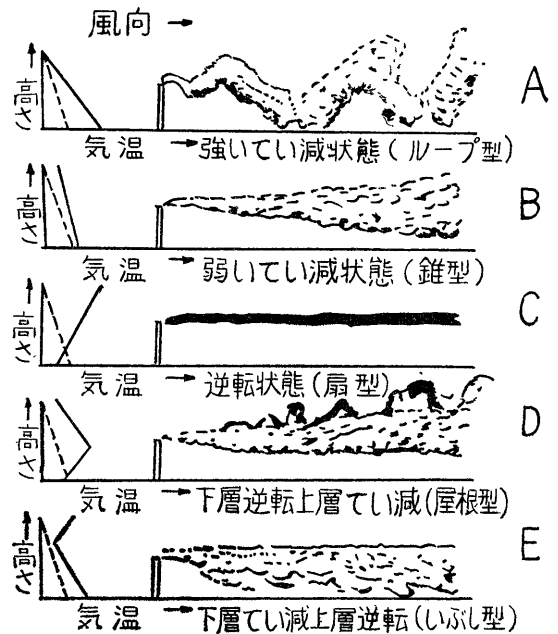
るとすると、拡散がとくに悪いような気象条件のときだけ低硫黄重油に切りかえることによって、汚染濃度の極端な増加は防げるはずである。大気汚染気象予報は、このような措置とあいまって、汚染防止に役立てることができよう。気象条件と大気汚染との関係は、このためにも不断に研究調査しておかねばならないと考える。

2———大気安定度

空気塊を垂直方向に微小変位させたとき、浮力が空気塊を原位置にもどすように作用するときを安定といい、その逆の場合を不安定という。大気安定・不安定は、気温の垂直傾度によってさだまる。いま、ある高度 Z_1 m における気温を T_1 °C とし、その上方高度 Z_2 m における気温を T_2 °C とすると、 $100(T_2 - T_1)/(Z_2 - Z_1) = \gamma$ が安定・不安定の指標となる。すなわち γ が -1 より小さければ不安定、 -1 より大きければ安定である。また $\gamma = -1$ の場合を中立という。気温が上方へ向かって上がる状態を、気温逆転という。逆転状態においては $T_2 > T_1$ となるから、大気は非常に安定なわけで空気は上下方向に変位しにくい。したがって乱流拡散に寄与するうずは減少し、拡散係数は小さくなる。気温逆転が大気汚染に大きな意義をもつことは以上によってあきらかである。

気温逆転はその発生する高度によって、接地逆転と上空の逆転とに分類される。接地逆転は地面の放射冷却によって発生するもので、その成因から考えてもわかるように、冷えこみの強い夜間によく発達する。上空の逆転は沈降気流によるもの、前線によるもの、移流によるもの、対流によるものなどがあるが、関東地方で大気汚染に影響の大きいのは前線性のものと沈降性のものとである。

図1 成層状態と煙の広がりモデル



大気安定度が空気の上方向の移動の難易性を示すものであることは、前述のとおりである。それゆえ煙突から出た汚染質のふるまいは、安定度によって大きな影響を受ける。図1は、煙の広がり方と安定度との関係を模図で示したものである。ここで強い逆転とは不安定状態を、弱い逆転とは、気温は上方へ向かって低下してはいるが、 γ が -1 と 0 のあいだにあって安定である状態をさす。この図からわかるように、不安定成層では煙のうねりが大きく、拡散が大きい。これは煙がはやく薄められることを示すと同時に、上空に放出された汚染質が地面に下りやすいことをも示すものである。

大気が安定になるにつれて拡散は小さくなり、非常に安定である逆転状態においては、図のCにみられるように煙は風によって水平に流されるだけで、あまり薄められず、濃密なまま遠方まで運ばれる。D図とE図は安定層と不安定層が重なっている場合で、下層不安定、上層安定のEの場合が地上濃度はもっとも高まる。

つぎに夜間の放射冷却によって発生する接地逆転について考えてみたい。この逆転層の厚さは放射

冷却の強さによって異なり、たとえば、シベリヤのように冬季の冷却のきびしいところでは3000mにもおよんでいる。わが国においては普通 500 m 以下であって、横浜市公害センターが根岸と鶴見で調査した結果によれば、横浜における接地逆転層の厚さは 300 m 内外となっている。いま有効煙突高*が300m以上であったとすると、この場合には図1のDのように煙は上方への拡散だけがおこなわれ、地面には下りてこないから、接地逆転は大気汚染防止の役割を演じていることになる。

* 煙突から出る高温ガスは、浮力と出口における運動量とによってある程度は自力で上昇する。この上昇量と煙突の高さを加えたものを有効煙突高という。

つぎに有効煙突高が 100 m の場合を考える。このときの煙は接地逆転層中に放出されるため、上へも下へも拡散されないで、どこまでも流れて行く。したがって、この場合も地面付近についてだけを考えれば大気は汚染されないわけである。しかしながら、横浜のように起伏に富んだ地形の場合には後述のように地形によって発生するうずがあって、このうずが 100 m 上空を流れている煙を地面にまき下ろす可能性がある。丘陵地帯においてはこのようなうずのおよぶ高さ以上に有効煙突高を設定する必要がある。

有効煙突高が数メートルないし数十メートルの場合、障害物のまったくない平地では逆転層中に放出された煙は接地しないりくつであるが、ちょっとした建物などがあってもその影響で煙は地面に引き下ろされることになり、接地逆転層は上方への拡散をおさえるという効果だけを与える。したがってこの場合には、逆転層は大気汚染を増大させる役割りを果たすわけである。

以上のように、接地逆転は大気汚染を防止する役割と増大させる効果とを同時にもつもので、われわれとしてはこの両刃の剣を上手に使いこなしたいものである。

1・気温逆転層

前節でちょっとふれたように、横浜市公害センターでは根岸と鶴見において気温逆転調査を実施した。ここでは主としてその結果にもとづき、横浜の下層大気の性状を大気汚染との関連において考察する。気温接地逆転は夜間の冷えこみが強い冬季によく発達する。表1は、横浜マリントワーで地上 1.5m と 78m との気温差が 3°C 以上もある強い接地逆転を観測した日数の集計であるが、接地逆転の季節変化がよくあらわれている。

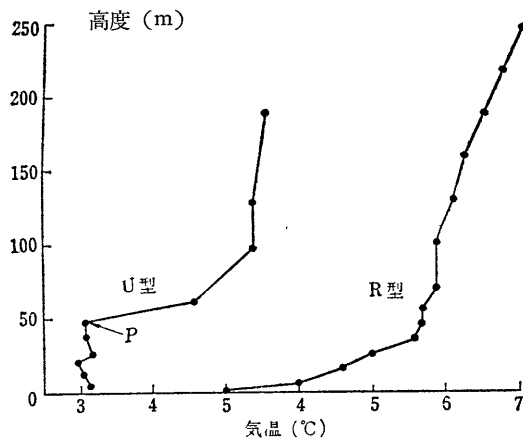
冬の接地逆転層は日没ごろから発生し始める。よいのうちはまだ地上数十メートルに逆転が形成されるだけであるが、夜がふけるにつれてしだいに強くなり、夜半ごろには厚さは 100 m をこえ、日の出ごろからその直後にかけて 300 m 近くまで成長する。朝の平均の厚さは根岸 260 m、鶴見 280 m となっている。日の出後は地表面からしだいに昇温するため、逆転は下方から崩れはじめ、日の出後 3～4 時間で接地逆転はまったく解消する。日の出後逆転が解消するまでのあいだは図1のEの状態にあるため、大気汚染にはもっとも条件の悪い期間である。この場合、上方の逆転が強いほど汚染質の上空への拡散が妨げられ、したがって地面付近の汚染濃度は高まることになる。事実、鶴見においておこなわれた逆転調査時の亜硫酸ガス測定値をみると、早朝接地逆転が発達した日には、日の出ごろから昼前にかけて高濃度があらわれ、逆転が強いほど濃度も高まる傾向があらわれている。

接地逆転層内の気温垂直分布には、二つの型があ

表1——強い接地逆転の月別発生日数<昭和41年>

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
日数	13	6	3	—	—	1	—	—	1	3	5	7

図2 接地逆転層内の温度勾配の分類



る。図2のR型とU型がこれである。R型は地面近くに非常に強い逆転がある型で、主として郊外で周囲に地形や建物などの障害物のないところに発生するものと考えられる。障害物のあるところでは風のごく弱いときに限って発生する。R型逆転はその強い安定度によって煙の接地を妨げる効果が大いいわけで、煙は上空に水平にたなびくことになる。この現象は田園地帯でしばしば見ることができ。この場合、たなびいている煙は逆転層のなかにおるわけで、かならずしも煙層が逆転層の上限を示すものではない。R型逆転中で地面近くに放出された汚染質は、拡散されないでいつまでも地面近くに存在する。したがって自動車排ガスなどにとってはもっとも具合の悪い逆転であろう。地上数十メートルの上空に放出された汚染質は、前述のように水平にたなびいて接地しにくいのであるが、丘陵の上にある住宅や高いビルの上部にはこの汚染質が濃密なままの状態でもとにもあたることになる。

つぎにU型逆転であるが、この型の特徴は図のように地上数十メートルの範囲で逆転が弱く等温状態になっていることである。いまこれを接地等温層とよぶ。接地等温層の成因には2種ある。熱因のものとし学的原因のものとする。地面の起伏や建造物などに風があたって発生する乱流によ

て空気が混合されると、逆転は弱められてU型の逆転層が形成されることになる。よってこの種のを乱流性接地等温層ということにする。

都市の中心部は周囲より高温になっている。この現象は都市気候としてよく知られているもので、その原因としては市内における燃焼熱、細じんその他による煙霧層、市内の建造物によって増加した気流の乱れによる熱交換、建造物の構成物質の熱容量などがあげられている。数百メートル上空の気温は、場所による違いがあまりないものと考えられており、地面付近の暖気はしたがって逆転を弱める作用をするわけである。これが接地等温層形成の第2の場合であって、これを熱因接地等温層と名づける。

根岸および鶴見区大黒町における公害センターの調査結果によると、根岸では無風状態のときR型逆転、2~5 m/s程度の風のあるときU型逆転が観測されている。それゆえこの接地等温層は乱流性のものである。この乱流は根岸地区の丘陵によって発生したものであって、乱流層の厚さは障害物の高さの0.6~1.2倍、最高2.6倍と観測されている。平地における高さになおすと、これは30~60m、最高130mである。

鶴見区大黒町では熱因接地等温層が観測された。ここでは風速に関係なく、観測された逆転層の大多数がこの型に属していた。等温層の厚さは40~100m、平均が70mで、最高は170mであった。

熱因性のもも乱流性のもも、U型逆転層は上空に強い逆転層があり、その下に等温層があるので、図1のEの状態に似ている。等温層中に排出された汚染質は、上方への拡散がおこなわれないのに、下方へはこれより拡散しやすい状態になっているため、地面濃度はあがりやすい。しかしその上の逆転層中へ排出すれば、汚染質の接地はおこなわれがたいわけである。したがってU型逆転層の発生する地域での有効煙突高は、少なくとも

接地等温層より高いことが望ましい。

横浜市は丘陵地帯にあるため、U型逆転は市内全域に発生するものと考えられる。市の中心部に発生するものは熱因性のものが多いと思われ、外周部においては乱流性のものとなる。外周部では風のないときはR型逆転が期待される。

2・風

風は風向と風速によって示される。一般に流体の運動には層流と乱流とがあるが、風は普通乱流状態にある。

風速は高さによっていちじるしく変化する。地表付近の風速分布は、ベキ法則、すなわち、

$$V = V_1 \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^\alpha$$

または対数法則

$$V = \frac{V_*}{k} \log \frac{Z}{Z_0}$$

で表わされる。ここでV、V₁はそれぞれ高さZ、Z₁における風速、αは定数である。またkはカルマンの定数でおよそ0.4、V*は摩擦速度、Z₀は粗度の長さで地面のあらさに関係する量である。

風速はこのように高さとともに増大するので、観測高度がまちまちだと、他との比較が無意味になる。気象庁では「平たんな開かつ地で地上10mの高さで観測する」のを理想としている。

図3 高度別風向頻度

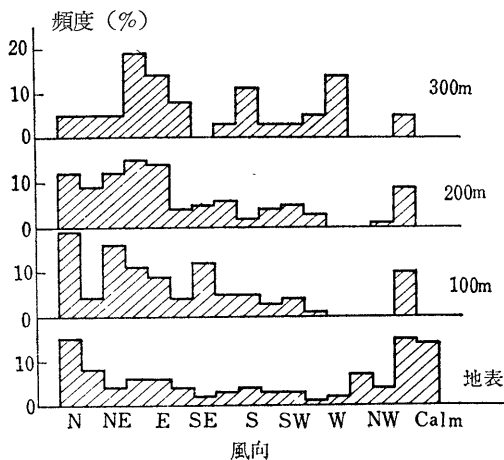


表2—横浜における海陸風開始時刻

区分	海風開始時刻					陸風開始時刻										
時刻	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1
回数	3	7	21	9	4	1	1	—	3	9	8	9	7	3	3	2

風向は地上数十メートルの範囲ではだいたい一定であるが、その上になると一般に地表とは違ってくる。変化は普通時計回りである。図3は、公害センターが根岸においておこなった観測をまとめたものであるが、地表の北風が高さとともに北東から東へと回っているのが見られる。最近はいしだいに高い煙突がつくられるようになってきたが、地表の風と上層の風には相違のあることを考慮しなければならない。

風速は地面状態によって変わり、なめらかな表面上では強く、あらい表面上では弱い。このため海上や平らな裸地では、起伏の多い丘陵地帯よりも風は強くなる。横浜市市内での実測の結果では、海岸と10km内陸との風速の比は、ほぼ2対1となっている。

おだやかな天気の良い日には海岸地方では海陸風がおこり、日中は海から陸へ、夜は陸から海へ向かう風が吹く。海陸風は一般風の強いときや雲の多いときはおこりにくい、それ以外の日にはかならずあらわれる。海風も陸風もその期間の中央でもっとも強く、はじめと終りが弱い。

大気汚染濃度の高まる冬期における横浜の海陸風開始時刻は、表2のとおりである。

4—気象条件と大気汚染

1952年12月の有名なロンドン・スモッグは無風状態で発生した。その後もロンドンでは似たような事例がなん回か発生しているが、いずれの場合も大きな高気圧におおわれて、風のないときであっ

た。そして地上およそ300 mくらいまでの範囲には、接地逆転が存在していた。ロンドンのスモッグは、弱風と接地逆転がその発生条件となっている。

ロサンゼルスでは夏から秋にかけてひどいスモッグが発生するのであるが、この季節は太平洋高気圧の強まる時であって、高気圧による沈降性逆転層がほとんど常時上空に存在している。スモッグの強さは、逆転層底面の高度が低いほど、そして逆転層が強いほど顕著であるとされている。秋になると日本と同様に接地逆転が発生するようになる。上空の沈降性逆転と接地逆転が同時にあるときは、スモッグはとくに強まるという。

わが国における大気汚染は、どちらかというところロンドンに似ている。上空の逆転層はロサンゼルスほど顕著ではないからである。

横浜におけるスモッグには晴型と曇型の二つの型がある。晴型は晴れていて風が弱く、早朝に強い接地逆転の発生したときにあらわれる。それゆえ朝の接地逆転の強さを観測すれば、日中のスモッグの程度を予測することができる。曇型スモッグは上空の逆転層がその発生要因となっている。この逆転層は前線によって発生することが多く、気圧配置は特徴的である。晴型スモッグは、昼近くなって接地逆転が完全に解消してしまうと消失してしまうため、その継続時間は長くないが、曇型のものは、同じような気圧配置がつづいているあいだは持続するので、数日にわたることもある。スモッグは空気が濁って遠方の見えない状態をいうのであるが、気象観測では視距離のことを視程とよんでいる。視程は空気中に微粒子が浮んでいるときに悪くなる。このことからわかるように、大気汚染要素のなかでは浮遊ばいじんが視程ともっとも関係が深くなっている。最近問題となっている亜硫酸ガスは、気体であるため視程とは関係がないはずである。しかしSO₂が酸化してSO₃と

なり、これが大気中の水蒸気と化合して硫酸ミストができると視程を悪くし、スモッグをおこすことになる。

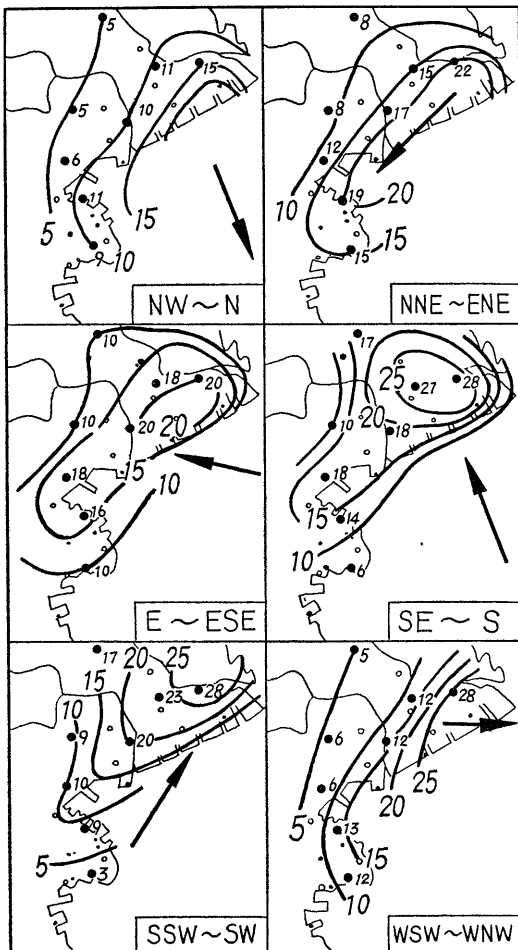
横浜においては浮遊ばいじん濃度はほとんど横ばい状態にあるので、濃いスモッグの発生日数も横ばいになっている。視程観測値を解析した結果によると、亜硫酸ガスの高濃度はかならずしもスモッグをとまっていなかった。亜硫酸ガスが白いスモッグとよばれるゆえんである。空気中に水蒸気がかなりあるときは、亜硫酸ガスが濃くなると視程も悪くなってくる。この場合のスモッグは割合うすくて、視程2 km内外のことが多い。1 km以下の濃いスモッグは、浮遊ばいじんによるものである。

浮遊ばいじんと亜硫酸ガスを、接地逆転と対応させて調べた結果によると、地上数十メートル程度の背の低い逆転層があるときは浮遊ばいじん濃度は高まるが、亜硫酸ガスは濃くならないことが多い。これは浮遊ばいじんの汚染源は低いところであり、亜硫酸ガスは高いところから放出されていることを示すものである。亜硫酸ガスと気温逆転との関係を調べるには、数百メートル上空までの気温調査が望ましい。

風は大気汚染質を運搬し、また拡散稀釈の作用をする。汚染源からでた汚染質は風に運ばれて移動するので、他の気象条件が一定ならばある地点の濃度は風向によって変化し、大きな汚染源の風下となったときにもっとも高濃度となる。風向による汚染濃度の変化を各地において測定した結果によると、どこでも鶴見・川崎の臨海工業地帯の風下になったとき、濃度の高まる傾向があらわれている。そしてこの傾向は、浮遊ばいじんよりも亜硫酸ガスの方が強くなっている。浮遊ばいじんは近傍にある雑汚染源の影響が大きく、亜硫酸ガスはそれよりも臨海工業地帯の影響が大きいわけである。

風向が同じときの亜硫酸ガスの地理的分布が似ていることから、風向別の平均濃度分布図が作成された。これを図4に示す。図によれば、臨海工業地帯を一つの大きな汚染源とみただることで、分布型がよく説明される。すなわち、すべての風系に対して、臨海工業地帯の風下に数キロメートルのところ汚染中心があらわれている。海陸風のように風向が日変化する場合には、図3にしたがって汚染域もまた移っていく。他の気象状況に変化がなければ、風向の変化を予測すれば濃度の高まる地域を予想することが可能である。横浜では夜から朝にかけては北寄りの陸風が卓越する。昼ごろになると表2のように海風が吹き出してくる。この海風の風向ははじめ東寄りでの、

図4 風系別の平均濃度分布



ちしだいに南に回ることが多い。中区方面の亜硫酸ガスは、この東風が吹き始めるとほとんどきまって高くなる。調査の結果、北寄りの陸風が吹いていたときに、東海上に汚染気塊が形成されていて、それが東風によって陸上へ舞いもどってくるという結果がえられた。しかし海上には測点がないので、この結論は厳密には実証されているわけではない。

大気拡散の式にはかならず風速がはいっている。風が強いときは、拡散が大きいので広域の大気汚染はおこらない。風が弱いと汚染質は拡散しないで滞留するため、汚染濃度は高くなる。

横浜・川崎市内9地点の亜硫酸ガスと風速との関係を調べてみると、事情はなかなか複雑である。特定地点のある時刻の風速と1時間平均濃度との関係は、あまり密接にはなっていない。むしろほとんど関係がないといった方があっている。日平均濃度を算出し、さらにその9地点の平均値を求める。これは広域日平均濃度である。広域日平均濃度と風速との関係は図5のようになり密接であって、濃度は風速に逆比例している。つまり特定場所の特定時刻の亜硫酸ガス濃度は、風速にあまり影響されないが、広域汚染は風速と高い相

図5 冬の日平均風速と広域平均汚染

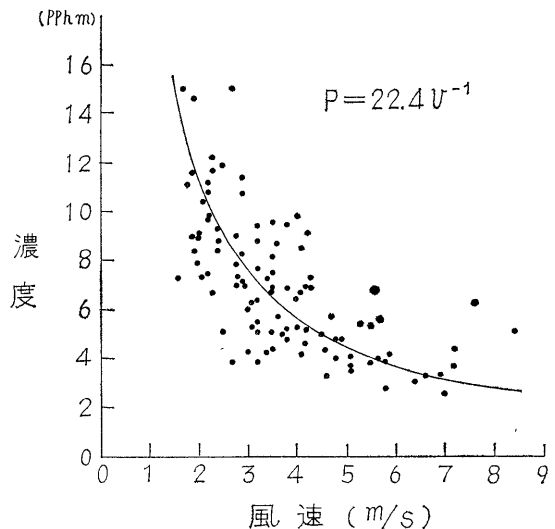
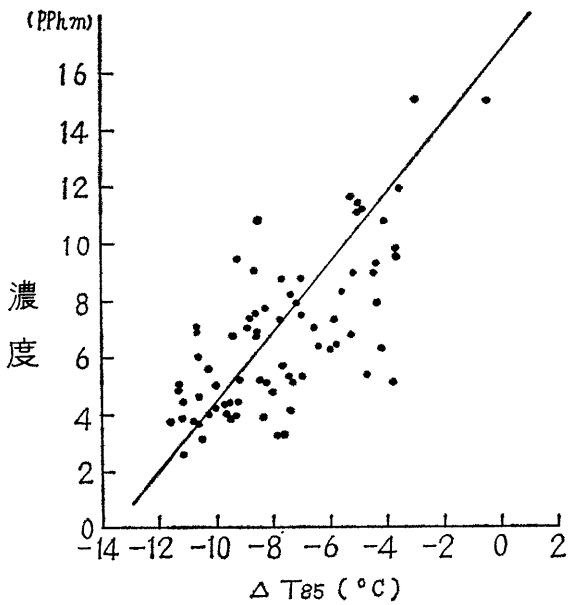


図6 冬の日平均の ΔT_{85} と広域平均汚染



関をもつわけである。

大気安定度と亜硫酸ガスとの関係も、同様に広域平均汚染をとった方が密接になることがわかっている。図6にこれを示す。図は茨城県館野の高層気象台で観測した850mb<約1,500m>の気温と、横浜の地上気温との差が安定度の指標として用いられた。横浜マリントワーで観測された安定度を使うと、図6よりも点がバラついてしまう。地上数十メートル層の安定度は、たんに日射、風速、放射などによってきまるものであるが、それよりも、前線とか沈降とか移流などに起因するより上層の安定度の方が、都市大気汚染にとっては大きな意義をもつことを、上の結果は示している。

<横浜地方気象台技術課長>