大気環境調査について

箕輪年雄*

Special Projects on Study of Atmospheric Environment in Japan

T. MINOWA*

Abstract

Recently, in Japan several projects on the study of atmospheric environment have been conducted by Japan meteorological Agency. The aims of these projects are to provide useful informations on the planning of a new establishment of industrial complex from the view-point of conservation of air quality.

This paper is dealt with results of the Akita Bay Area Project and also includes results of the Western Seto Area Project and the Mutsu-Ogawara Area Project. Akita Bay Area is located on Japan Sea side of the northern Honshu. Then special emphasis was given on the meteorological observation in atmospheric boundary layer in this project. Especially, distribution of wind and temperature was observed not only horizontally, but also vertically.

The author analyzed the surface airflow, air-stream and temperature distribution in atmospheric boundary layer, inversion layer and mixing height in this area.

I. はし が き

大気汚染にかかわる大気環境保全のための対策を検討するのに必要な、基礎的な気象資料を得ることを目的とした調査が気象庁において実施されている。対象地域は大規模工業基地関連の西瀬戸・むつ小川原・秋田湾地域及び超過密状態にある南関東地域である。調査は昭和46年度から順次3年計画で実施されており、現在南関東の調査が進行中である。

工業地域などのように大気汚染源が地面付近にある場合でも、汚染質は大気境界層内に広く拡散することが多い。このような汚染質の移流拡散に関する気象調査は、大気境界層を含む低層大気を対象とするものでなければならないというまでもない。これに対して既設の気象観測所では地上観測の資料しか得られないのが実情であり、また気象庁の高層気象観測は大気の大規模な流れを対象としているため、大気汚染のような局地性の強い現象とくらべるとその観測点密度は極めて疎であって、全国で18地点で観測されているに過ぎない。このような気象観測の現状であるから、調査は低層大気の気象観測から始められた。

大気汚染質の大気中における振舞いにはいろいろあるが、移流と拡散は最も重要なものとしてあげられる。これは気流と成層状態に関係するので、風と気温の空間的・時間的分布の実体把握を目途とした観測が実施された。観測は通年観測と特別観測とに区分される。通年観測は既設観測点における地上観測を主

* 名瀬観候所, Naze Meteorological Observatory

とするが、既説点の疎な地域には地上風や気温の観測点が追加設置されている。またむつ小川原と秋田湾地域では50mの気象観測塔による接地気候観測が実施されている。

大気環境を考える場合にはいろいろな気象条件の年を通じての出現率が問題になることが多い。そこで特別観測は、年間の多様な総観場における地域の特徴がつかみ易いように、各季節におよそ7日間ずつ実施された。特別観測においてはおおむね2000m以下の低層大気の気流と気温の観測が実施されているが、むつ小川原と秋田湾地域における調査では、大気拡散の観測も行われている。これは航空機を用いて地上数百メートル高度に発煙し、その煙流の拡散状況をPPI-RHIライダーで測定したものである。

むつ小川原及び秋田湾地域においては開発前のバックグラウンド汚染を把握しておくため、その一つの指標としてエロゾル濃度の通年観測も行われている。

特別観測は各季節に約7日間ずつ行われたものであるが、この観測値を集計したものを年間の統計値とするのは妥当でない。そこで特別観測から気候値を推定するため、多変量統計モデルによる低層大気のシミュレーションが実施されている。これは特別観測による観測値と、常設観測点の観測値との関係性を導き出し、この関係式を用いて年を通じての統計値を求めたものである。更にこのような気象条件による大気汚染ポテンシャルについての検討も実施されている。

II. 特別観測の概要

特別観測はおおむね2000m以下の大気低層における移流拡散に関する気象の観測であって、気流や大気成層の空間的・時間的分布を知るため、主として風と気温の観測が行われた。観測期間は年を通じての気候状態がつかみ易いように、各季節毎におおむね7日間設定され、更に関東を除く地域では地元の県当局において梅雨期の観測が行われている。

気温の観測は西瀬戸地域においてはサーミスター式自記温度計を装着したヘリコプターによって実施された。ヘリコプターはアルエットII型が2機使用され、周防灘周辺及び海上の定点においてせん回下降しながら気温が観測されている。この観測は朝・昼・夕の1日3回実施されている。

第1図 秋田湾地域における特別観測の観測地点

他の地域における気温観測は低層ゾンデ(LTS-72型)によって行われた。観測時刻は9・15・20時の1日3回で、南関東ではこの他に6・12・18時にも観測されている。南関東では特定の日に湿度ゾンデによって気温と同時に湿度が観測され、また超音波レーダーによる気温逆転層の観測や低層レーウィンゾンデ観測・係留気球による観測なども行われている。

低層の風はパイボール観測を主とし、一部地点でレーウィン観測が行われた。観測時刻はおおむね6時から20時までの毎正時である。また無揚力気球(ノンリフトバルーン)を低空に流し、これを二次レーダー方式で追跡するという流跡線観測も実施された。

流跡線観測に用いた無揚力気球はポリエステル膜で作製された直径約2mのもので、これにトランスポンダーが装置されている。この気球をレーダーで追跡するわけであるが、使用された装置による気球の探知半径は約50kmである。気球高度は西瀬戸における調査においては測風経緯儀によって測定されたため、気球が遠距離に流れたときの高度は測れなかった。その他の地域での調

査においては、その後の装置の改善により、気球に装着された気圧計の気圧信号をレーダーで受信できるようになったため、すべての流跡上で高度が測定されている。なお、無揚力気球の高度は200ないし400mで平衡するように調整された。

観測点の配置の一例を第1図に示す。これは秋田湾地域におけるものであるが、他の地域においてもこれと似た密度の観測網が構成されており、局地風系や大気成層の分布が観測できるようになっている。図で海上にある観測点は気象観測船によるものである。また流跡線観測用のレーダーは秋田市内の小丘上に設置されている。

III. 観測結果の概要

それぞれの地域で実施された通年観測及び特別観測の成果により、地域内の気流や大気成層の状態が解析されている。そのすべてを記すことはできないので、地域毎にいくつかの特徴的な状態を述べることで、第1節に述べたその他の調査については割愛する。又南関東地域における調査は現在進行中でもあるので、これについてもここでは触れない。

1. 西瀬戸地域

(1) 地上流線

毎日の流線図を作成してみると、風が弱いときは各地の風向が区々となるが、風が強まると、全域の流線はほぼ一様になってくる。そのときの流線の走向の出現率は第1表のとおりで東西流の卓越していることが分る。西風は寒候期に多くて北偏してW~NWとなり、東風は暖候期に多くやや南偏して現われ易

第1表 流線の走向(15時, 1970・71)

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	その他	計
9	0	17	5	2	1	13	18	34	100

い。風がやや弱まってくると山口県東部と大分県の中津~長州付近では海陸風の現われることが多い。秋穂から関門にかけての地域及び姫島では主風向に従った東西流が吹き易く、風速も強い。

(2) 風速の地理的分布

特別観測の結果から風速の出現率をとってみると下関から姫島に至る強風帯があり、軸の走向は卓越風向と一致している。この強風帯は下層では顕著に現われているが、高度を増すにつれて薄まり、1000m以上では風速の地域差はほとんど認められない。

(3) 海陸風の地上風系

天気が良くて風の弱い日を選び出し、地点別の卓越風向とその風向の平均風速を求め、地上気流の合成図を作成した結果が第3図に示される。資料は昭和46年9月から1年間のものが使用された。

夜間は陸上から周防灘に収束する気流が卓越し、風速は2m/s内外の所が多いが内陸部では静穏に近くなっている。北九州市の風は周防灘へ流れるものと響灘へ流れるものが現われている。昼は気圧勾配のほとんどないときはD型、地衡風向がSE~SのときはD_E型、W~NWのときはD_W型になる。Dは周防灘から四方へ発散する型でその平均風速は3m/s内外となっている。D_EとD_Wにおいては山口県側においては地衡風向に従った風が

第2図 風速7m/s以上の出現率(%)の地理的分布

第3図 晴天弱風時の気流合成図 (長羽1本2 m/s 短羽1本 m/s)

第4図 海風最盛時(左図)と朝の陸風時(右図)における発散の高度別度数(●:発散, ○:収束)

吹いているが、九州側では海風となっている。

(4) 海陸風の鉛直分布

特別観測期間に陸風又は海風の発達した日がそれぞれ15日あった。陸風時の気流は周防灘への収束、海風時の気流は周防灘からの発散として特徴づけられるので、朝の陸風時及び昼の海風最盛時における各高度の気流の発散か収束かを調べた。第4図にその度数分布を示す。陸風高度は100~500m、海風は400~1000m、地上の発散(収束)の上に収束の現われた例はおおよそ

$\frac{1}{2}$ である。

(5) 九州の局地低気圧による気流

暖候期の日中、九州に局地的な低気圧の発生することがある。このときはアジア天気図からは期待されない東風が吹く。その1例を第5図に示す。この東風は地上数百メートル以下にみられる現象で、この例のように山口県側まで東風になることもあり、また九州側だけに現れることもある。この日は9時頃から海風が吹き出していたが、昼頃から東風が卓越するようになり、14時が最盛で夕方から次第に衰えた。

(6) 気温日変化量の鉛直分布

気温鉛直分布の観測は朝・昼・夕の1日3回であるため、気温日較差の正しい値は求められない。そこでこの3回の観測値のうち最高値と最低値との差を高度別に求めて日変化量とした。観測地点を山間、沿岸・海上の3群に分け、二俣瀬・勝山・安心院の平均を山間(M)とし、宇部・行橋・長州の平均を沿岸(C)とし、海上2地点(第5図に白丸で示した地点)の平均を海(S)とした。結果は第6図のとおりである。日変化量は一般に下層で大きくて、地上500m以上では小さい。下層の日変化量は山間部で最も大きく、沿岸がこれにつぎ、海上の日変化量は高度にかかわらずほぼ一樣になっていることが特徴的である。

(7) 気温逆転層の出現率

この地域の気温逆転には接地性のものが多く、これは内陸部の冬と秋の朝には50%以上の出現率をもっている。海面温度は春から夏にかけては気温より低くなっているが、海上における接地逆転は夏(6月・8月)に高い出現率を示し、秋にはほとんど観測されていない。海上の接地逆転は陸上におけるような放射性のものではないので、気温の高まる昼から夕にかけての出現が多い(第2表)。

第5図 天気図(8月5日, 1972)と
流線図(250m)

第6図 気温日変化量の鉛直分布

2. むつ小川原地域

(1) 風速の地理的分布

下北半島のつけ根の小川原湖北部に東西にのびる帯状の強風域が現れていて、むつ湾と太平洋を結ぶ風道を形成している。この強風帯は季節に関係なく現われているが、どちらかというとも寒候期よりも暖候期の方が顕著である。強風帯の現れる高度はおおよそ1000m以下であって、それ以上の高度では第7図にみられるように風速の地域差はほとんどなくなっている。

第2表 高度別の気温逆転層出現率(%)

高 度	季	山 間			沿 岸			海 上		
		朝	昼	夕	朝	昼	夕	朝	昼	夕
0~50m	冬	47	4	9	39	4	6	15	7	29
	夏	23	0	0	6	0	10	20	33	50
	秋	64	0	7	56	10	23	8	0	0
50~150	冬	55	4	0	31	19	10	18	22	14
	夏	18	0	0	25	10	0	15	27	56
	秋	58	0	0	45	3	0	0	5	0
150~300	冬	24	0	7	23	14	6	29	21	14
	夏	22	0	0	9	13	17	31	13	0
	秋	16	0	0	7	0	0	6	0	0
300~1000	冬	19	3	10	13	3	14	24	11	9
	夏	6	10	5	5	5	8	13	13	7
	秋	26	13	8	22	3	0	15	7	0

第7図 高度別の平均風速地理的分布（6月と8月の平均）

第8図 東分風出現率の鉛直分布（三沢）（Y：やませ期間，N：非やませ期間）

(2) やませ風の鉛直分布

三陸沿岸地方では東寄りの風をやませと呼び、夏季のやませは低温をもたらすので凶作風として知られている。いま新納屋の3時間毎の風向観測表において、NNE~SSEの風が6回以上続いている期間をやませ期間と定義した。ただしやませの短期間の中断はこれを連続しているものとみなした。このように定義されたやませは、1971年から3年間の観測によると、5月から9月までの暖候期に多く、6月中旬から9月中旬までが最も現れ易くなっている。しかし8月上・中旬の盛夏期の発生は少ない。またやませの5~9月における平均持続時間は約3日となっている。

5月から9月までのやませ期間内に、三沢の各高度の風向がNNE~SSEとなっていた度数百分率が第8図に示される。図には5~9月のやませ期間外に現れたNNE~SSEの度数百分率も非やませとして記入されている。資料期間は1972、73の2年間である。

第9図 やませ期間の卓越風
(8~18h)

第10図 やませ日と非やませ日との日最高気温の差 (ENE
~ESE)

図によればやませ期間の東分風出現率は地上から400m までほとんど一定である。したがってやませの東分風の 高さは一般に400m 以上であることがわかる。東分風出現率が地上の $\frac{1}{2}$ となる高度は1600m, $\frac{1}{3}$ となる高度はおおよそ3000m である。

(3) やませ期間の卓越風

特別観測のうち、やませ期間に含まれているものを抜き出し、最多風向とその風向の平均風速を求めて作成したのが第9図である。図は 350m 高度のもので、卓越風向はおおむね ESE であり、その地域差は少ない。一方風速には顕著な地域性が認められ、第7図と同様に下層においてははっきりした強風帯が存在している。

第11図 三沢の層別平均気温減率
の年変化 (9時)

第12図A 気温逆転層の観測例
(6月12日15時, 1973) S: 新納
屋, KA: 川内, KO: 小沢口

第12図B 地上天気図, (6月12日
9時, 1973)

第13図 沿岸と内陸との風速差の鉛直分布

の一例を第12図に示した。図示した3地点は第7図にその位置が示してある。この例は逆転層が最も顕著に現われた場合であるが、数十キロメートル離れた3地点ともほぼ同じような逆転層が観測されている。このときの風向は地上天気図からも分るように東ないし南東となっていたが、内陸にある小沢口では逆転層から下の気層で 2°C 近い昇温を示している。

3. 秋田湾地域

(1) 沿岸と内陸との風速

風速は一般に沿岸部で強く内陸で弱い。沿岸と内陸との風速差の鉛直分布が特別観測資料によって調べられた。これが第13図である。海岸から5km以内にある6地点(能代・脇本・女川・天王・秋田・本荘)の平均値を沿岸の風速とし、内陸風速としては海岸から28kmの上小阿仁、31kmの鷹巣、38kmの大曲の3地点の平均をとった。両者の差を高度別に求めて図が作成されている。

寒候期では200m以下、暖候期においては300m以上の接地層では沿岸と内陸との風速差は 2 m/s 内外で、鉛直方向にはほとんど変化していない。この層における風速差は暖候期より寒候期の方が大きい傾向が現れている。接地気層の上空での風速差は高度を増すにつれて減少している。減少の割合は寒候期に大である。沿岸と内陸との風速差のなくなる高度は暖候期で約900m、寒候期で700~800mとなっている。

(2) 風系別の合成風

特別観測時の流れ線図が作成され、気流の方向にしたがってこれを8方位の型及びその他のものに分類された。各分類型別に観測地点の卓越風向とその分類型の平均風速が求められ、合成図が作成された。そのうち特徴のあるものが第14図に示されている。

図の左は男鹿半島付近に北東風が卓越している場合である。このとき雄物川流域の地方ではE~S風となっていて、風速は北部よりも弱い。図の中央は南東気流の場合である。雄物川流域では南東が強く、北方の米代川流域では弱い東風になっている。図の右は北西流の場合である。大平山地を迂回するような気流がみられる。

(4) やませ期間の気温

1日の大部分(6/8)がやませ期間に入ったときをやませ日とした。やませ日と非やませ日のそれぞれについて、日最高気温の月間平均値を求め、両者の偏差を求めた。資料期間は昭和46年から3年間の5~9月である。第10図には新納屋の風向がENE~ESEのときのものが風速階級別に示してある。やませ時の低温の偏差の最も大きい地域が小川原湖周辺に現われている。

(5) 気温の鉛直分布

三沢の2年間の高層気象観測資料から、層別の月平均気温減率を求めて作成したものを第11図に示す。接地気層の減率は冬に小さく夏に大となっている。400m以上における減率は冬に大きく夏に小さい年変化を示し、6~7月の梅雨期に最小となっている。この傾向の最も顕著に現われる高度は400~800mであって、梅雨期にはこの高度に気温逆転のおこり易いことを示唆している。

6月の特別観測期にはやませがよく現われた。このときの気温鉛直分布観測によれば、地上数百ないし千メートル付近に顕著な気温逆転層のみられることが多い。そ

第14図 風系別の合成風 (150m)

第15図 海風の日変化例 (8月22日, 1974)

(3) 海風

日変化による風は昼は一般に西寄り、夜は一般に東寄りである。この風は海に近い所では海陸風、内陸部では山谷風というのが至当と思われるが、ここでは便宜的に海陸風と総称している。

海風の流線には二つの型がある。その一は第15図の12時の気流型、他は16時の気流型である。前者をA型、後者をB型ということにする。A型の特徴は秋田湾北部における発散と男鹿半島を縦走する収束線である。B型の特徴は一様な北西流である。毎日の流線図を調べた結果によると、海風の前期にはA型が現れ、後期にB型になっている。A型からB型への転換は収束線の南下という形をとることが多い。秋田湾北岸の地域では海風がA型からB型に変わると風は南から北に転じ、あたかも陸風が吹き出したかのようにみえる。海風の一般風向は図の例では始め西であったものが16時には北西になり、更に18時には北になっている。このように風向が時計廻りに変る現象はよくみられ、海風末期の風は北寄りになることが多い。

海風の高さは一般に500~800mである。海風内の気温減率は大きく、ほとんどの場合全層が混合層になっていた。海風の風速は200m付近で最も強まっているようである。

第16図 流跡線観測例 (10月15日, 1974)

第17図 気温日変化の鉛量直分布 ($T_{20h} - T_{15h}$)

(4) 流跡線

無揚力気球が5日間に11回放球された。放球は1回に1又は2個である。2個の場合は結びつけた気球を放球点上空で切り離すという方法がとられた。放球点は脇本である。

パイボール観測による流線間と比較してみると気球の流跡及び流速は流線図による気流の向き及び風速と細部を除けばよく適合していた。特に風速が4 m/s 位以上のときの流跡線は割合単純な形状を示し、流線に沿ったきれいな流跡を示している。気球の流速が約2 m/s 以下のときは風向変化が多く、流跡線は複雑な形状を示した。流線が東西に発散し、風の極く弱いときの観測で同時放球の2気球が、1は東方の天王へ、他の1は西方の女川へと進んだことがあった。また一旦海上へ出た気球が気流の変化によって逆戻りして上陸したこともあった。

無揚力気球の高度はおおむね毎分に測定されている。程度の差はあるが、すべての観測例に気球の鉛直変動がみられている。その変動幅は小さいときは10m 内外又は数十メートル程度であるが、大きいときは400m をこえた。気球が山地へ進んで徐々に高度を上げた例が1回あったが、気球の鉛直変動は主として大気の安定度に関係しており、地形や地表状態との関連は見られなかった。

寒気の移流等によって成層が不安定で雄大積雲の発生するような気象条件のときは、曇天時でも強い鉛直運動が観測された。第16図はその1例である。地上気象要素から推定される安定度分類はこのような場合には適用できないようである。図の観測では2個の気球が同時に放球されているので、これを実線と点線で区別してある。また、右上の流跡線においては2個の気

第18図 日平均風速の寒風山と脇本 (350m) との比較
(●: 西寄りの風, ○: 東寄りの風)

第19図 寒風山と脇本 (350m) の風配図
(実線: 寒風山, 点線: 脇本)

球はこの図の縮尺では区別できない程度に接近していた。

(5) 気温日変化量の鉛直分布

気温鉛直分布の観測は9・15・20時に実施されているので、日変化量の指標として15時と20時の気温差を用いた。各高度毎にこの気温差の平均を求め、これを第17図に示した。図には変化量の最大であった10月と、最も小さかった12月の分が記入されている。日変化の大きい高度は地上から200ないし400mの気層であり、また内陸部では沿岸より大きな値を示している。

(6) 寒風山の風

寒風山は標高355m はほぼ円錐状をなした孤峯で、男鹿半島の基部に位置している。この山頂に風向風速計が設置され、通年観測が実施された。寒風山頂の南東方約4kmの平地にある脇本で行われた特別観測の値を用い、山頂の風が自由大気中の風を示しているかどうかを検討した。

日平均風速の寒風山と脇本上空50mとの相関図は第18図のとおりである。脇本の上層風の観測は毎日6時から18時までの毎正時及び20時であり、天候によっては350mの風が観測できなかったこともある。そこで脇本に350mの観測値の有る時刻についての平均を日平均値とした。観測日数は各季節の合計35日間である。寒風山の風向が西寄りのときと東寄りのときで両者の関係が違うので、図には卓越風向が東分をもつ日と西分をもつ日とで区分してある。この相違は山頂付近の地形と風速計のある位置によるものと思われる。図にみられるように寒風山頂の日平均風速は自由大気のそれと高い相関を示しており、その利用価値は大きい。

特別観測による脇本350mの風配図と、寒風山頂の風配図を第19図に示す。寒風山の風配図は脇本に350mの観測値のある日時のものを選び出して作成してある。図によれば、寒風山頂の風配図は脇本上空350mのものと細部を除けばよく適合しており、自由大気の風向をよく示しているものとみなされる。

IV. 終りに

前節で述べたような気象解析のほかに、2000mまでの低層大気的气象統計値が、多変量統計を用いて算

出されており、またむつ小川原地域と秋田湾地域では航空機で地上数百メートルに発煙し、その煙流の拡散状況がライダーで測定され、地域の拡散特性が調べられている。同地域ではまた50mの気象観測塔による接地気象の通年観測が実施されており、このような気象条件による大気汚染ポテンシャルについての調査が実施されている。

南関東地域における調査は他の地域と異なり、環境庁と共同で行われている。関東地方の平野部全域に及ぶ広域移流拡散モデルの開発と、それによる大気汚染濃度の数値シミュレーションを環境庁で担当し、大気汚染に関連する気象の調査を気象庁が受け持っている。気象庁における調査は前述の観測の他に、(1)気候解析、(2)局地風系と大気成層の気象解析、(3)ヒートアイランドや都市風についての都市気候、(4)関東地方の地形を与えての、海陸風循環の数値シミュレーション、(5)多変量解析による低層大気の気候値の推定、などによってこの地域における移流拡散場の実体を明らかにすることである。

関東地方における気象状態については従来も各種の調査がなされているが、主として地上観測に基づいたものであった。地方公共団体による下層大気の大気調査が何回も行なわれたこともあったが、調査地域の関係で関東地方における局地風系の一部しかとらえられていないというらみがあった。今回の調査は関東地方の平野部全域の大気境界層を対象としているので、今までの調査では分らなかった移流拡散場の空間的・時間的詳細の分布が明らかにされることであろう。

昭和46年度から進められている以上の調査は気象庁観測部(産業気象課)が気象研究所・気象大学校及び地元気象官署と協力して実施しているもので、調査委員会や作業委員会が適宜組織されて推進されている。又関係の地方公共団体等からは観測資料の提供などの協力を得ている。大気環境保全を考える上で、その基礎となる気象関係の情報を与える本調査は、今後の諸計画に大きな寄与をするものと期待している。

(1977年2月25日受理)