

中讃地域内陸部における海陸風循環特性 と光化学オキシダントについて(第二報)

Photochemical Oxidants and Characteristics of Sea and Land
Breezes Circulation above the Inlands in Chusan Area (II)

山本 務 中野 智 岩崎 幹 男
Tsutomu YAMAMOTO Satoru NAKANO Mikio IWASAKI
藤岡 博文 森下 玲子 美澤 誠
Hirofumi FUJIOKA Reiko MORISHITA Takeshi MIZAWA

55年度に引き続き、56年度は内陸部において海岸線と平行に複数の特別観測地点を設け、地形の違いが地上風、大気汚染物質濃度等にどの程度影響を与えるかについて調査を実施した。その結果、中讃地域のオキシダント濃度分布は臨海部よりも内陸部で高濃度になるが、上空風の風系によっては地形の影響を強く受け、同じ内陸部の局であっても地形の平坦な局とそうでない局とではまったく異なった様相を呈した。また、調査期間の8日についてクラスター分析等を用い、オキシダントの濃度分布特性を検討したところ上空風の風系別に分類するのがよいと思われる結果が得られた。その他、早朝、海上部で窒素酸化物の蓄積が日中のオキシダント日最高濃度に関与すること、上空のオキシダントのベースは高く、場合によっては夜間強いS風により地上へ降下し、局地的な汚染が発生すること、などを示唆する資料も得られた。

はじめに

光化学オキシダント(Ox)による大気汚染は全国的な問題となっている。二次汚染物質であるOxはその生成・輸送においても一次汚染物質と性格を異にしているため、実態把握もまだ十分になされていない。これらの問題を解明するため全国各地で調査・研究が行われているが、香川県においても県下随一の工業地帯を有する中讃地域において、Oxの生成・輸送等の実態を把握・解明するため昭和53年度からこれらに関する調査研究事業を実施している。53、54年度には同地域の島しょ部から臨海部にかけて調査を実施し、その成果についてはすでに当所報で報告しているところである。引続き55年度からは3年計画で臨海部から内陸部へかけての調査を実施しており、55年度の第1回調査では海岸線に直角方向へ平坦な地形を選び調査地点を設け実施した。その結果、海風により臨海部の大気汚染物質は内陸部まで輸送されるがそれらは長距離輸送されことなく夜間の陸風等により吹きもどされ低い混合層内で蓄積されやすいこと、Ox濃度は臨海部よりも内陸部へ行く程濃度が高くなり、しかも地表面よりも小高い山腹部でより高濃度になるが、NOx濃度はOx濃度とは逆の傾向になること、等が解明された。

56年度ではこれらの調査結果を踏まえ、次の目的で第2回目の調査を実施したのでその結果を報告する。

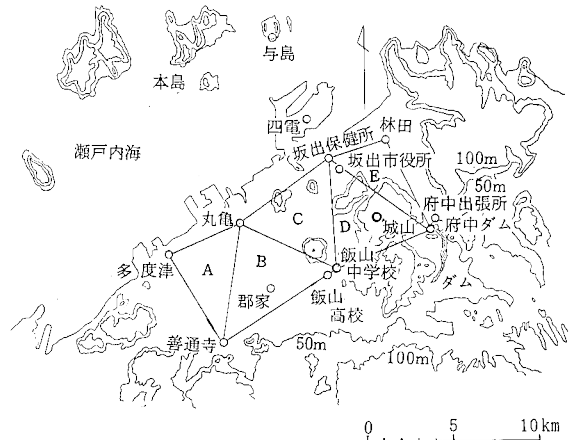


図1 調査地点

- (1) 内陸部に海岸線と平行に複数の調査地点を設け、地形の違いによる大気汚染物質濃度の分布状態の把握。
- (2) 地形の違いによる風の立体構造・水平発散量の実態把握。
- (3) 臨海部から内陸部にかけて、地形の影響を加味した大気汚染物質の生成・輸送過程を上記2点から推察し、同地域の風場あるいは大気汚染物質濃度の分布特性を分類する。

調 査 方 法

1. 調査期間

昭和56年 5月27～28日, 7月21～22日, 8月5～6日, 9月1～2日の計8日間

2. 調査地点

各調査地点の位置は図1に示し, 同名称は次のとおりである。

島しょ部: 与 島

臨海部: 四電坂出力発電所(四電), 林田出張所(林田), 坂出市役所(坂出), 坂出保健所(坂出), 丸亀市役所(丸亀), 多度津町役場(多度津)

内陸部: 府中出張所(府中), 府中ダム(府中), 飯山中学校(飯山), 飯山高等学校(飯山), 郡家公民館(郡家), 善通寺市役所(善通寺), 高度400m地点の城山(城山)

なお, 地形の影響を調べるため, 図1に示すとおり三角形A, B, C, D, Eの5エリアを選び, ベラミー法¹⁾により地上の水平発散量を算出した。また, 上空の水平

発散量算出のための三角形については, 5エリアを同時にパイボール観測することは困難であったので, 期間を分けて実施し, 5, 9月については田園地帯の平坦な地形を囲むエリアBを中心に, 7, 8月については高度462mの城山を囲むエリアDを中心に観測を実施した。

3. 調査項目

大気汚染物質として, O_x , O_3 , NO, NO_2 を中心に, 気象要素としては, 地上風, 日射量, 降雨量, 上空風, 上空気温等を測定した。これらの調査項目, 測定方法等については表1, 2に示すとおりである。なお, その他必要に応じて高松地方気象台の資料も用いた。次に, 気象要素を解析するに際して, 地上気圧傾度ベクトル, ベラミー法による水平発散量, 風の調和解析を用いたが, これらの算出方法については別表1, 2に示す。調和解析の算出方法については第1報²⁾で説明しているので省く。

調査結果および解析結果

気象条件一覧表は表6, パイボール観測による風の鉛直分布結果は図13, 低層ゾンデによる気温の鉛直分布結

表1 大気汚染物質調査

調査項目	調査方法	測定地点		調査期間	測定時間
オキシダント	2%中性ヨウ化カリウム法による自動測定機	臨海部	林田 坂出 丸亀 多度津	5. 7. 8. 9月	0 ~ 24時
			内陸部		
内陸部 (高度約400m) ¹⁾	郡家*	5. 9月			
	内陸部 (高度約400m)	城山*	7. 8月		
窒素酸化物		ザルツマン法による自動測定機 (係数 0.84) (酸化率 70%)	島しょ部	与 島	5. 7月
	臨海部		林田 坂出 丸亀 多度津	5. 7. 8. 9月	
			内陸部		飯山 善通寺
	内陸部 (高度約400m)			郡家	5. 9月
内陸部 (高度約400m)		城山	7. 8月		

註) 測定地点のうち, 坂出は坂出市役所, 府中は府中出張所, 飯山は飯山中学校を表す。

表2 気象調査

調査項目		調査方法	測定地点		調査期間	測定時間
上空	高度2,000 mまでの風向風速	パイボールによる一点観測法 (上昇率100 m/40秒)	臨海部	丸亀	5. 9月	初日:10~19時 二日:7~14時 善通寺, 府中のみ10時~(連続) ~14時まで
			内陸部	善通寺		
			臨海部	坂出	5. 7. 8. 9月	
			内陸部	府中		
気象	高度2,000 mまでの気温	低層ゾンデ	臨海部	丸亀	5. 9月	10時30分
				坂出	7. 8月	15時30分
	高度200 mの風向風速	煙突に設置した風向風速計	臨海部	四電	5. 7. 8. 9月	0~24時
地上	地上の風向風速	風車型微風向風速計	島しょ部	与島	5. 7月	0~24時
			臨海部	林田	5. 7. 8. 9月	
				坂出 丸亀 多度津		
			内陸部	府中 飯山 善通寺 郡家		
	内陸部 (高度約400 m)	城山		7. 8月		
日射量	エプリー式全天日射計	臨海部	坂出	5. 7. 8. 9月	0~24時	
雨量	転倒ます型雨量計					

注 測定地点のうち、飯山は飯山高等学校(パイボール観測)、飯山中学校(地上風観測)、坂出は坂出保健所、府中は府中ダムを表す。

別表1 地上気圧傾度ベクトルの算出方法

中讃地域を囲む4地点(大阪-広島, 鳥取-室戸)の各気象台午前9時観測の海面気圧を用いて算出する。

○気圧傾度力 = $\sqrt{\left(\frac{\Delta Px}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Py}{\Delta y}\right)^2}$

○地衡風向
大阪-広島方向を東西方向, 鳥取-室戸方向を南北方向とすると, 座標 $\left(\frac{\Delta Px}{\Delta x}, \frac{\Delta Py}{\Delta y}\right)$ を原点を中心に右へ90°回転させた北からのズレ角 θ で表す。

Δx : 大阪-広島間の距離
 Δy : 鳥取-室戸 "
 ΔPx : 大阪-広島間の気圧差
 ΔPy : 鳥取-室戸間 "

別表2 水平発散量の算出方法

風の観測が得られる3地点a, b, cを選び, 各地点の風速による三角形abcの面積変化を別々に算出し, それらを加算することにより発散量を求める。

今, a点の風速による空気塊はΔt時間後にa'に移動したとすると, これによる発散量DIVaは

$$DIVa = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{a'bc - abc}{abc} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{h'a - ha}{ha} \right) = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{na}{ha}$$

同様に, DIVb, DIVcを求めて加算する。

$$DIVabc = DIVa + DIVb + DIVc$$

発散: $DIVabc > 0$
収束: $DIVabc < 0$

果は図14, 風の調和解析結果は図15, 地上エリア別水平発散量は図16, 高度別水平発散量は図17, そして大気汚染物質濃度の日変化は図18にそれぞれ示す。なお, パイボール観測結果については風速の変化の大きい高度, 風向の東西・南北成分に変化がみられた高度に破線で区分けを入れた。低層ゾンデ観測結果には乾燥断熱減率線(Γd)を記入し, 実測の鉛直分布と比較した。調和解析結果についてはベクトル平均値と1日周期成分楕円および1/2日周期成分楕円を図示し, 1日周期成分楕円については矢印で楕円の回転方向を, 1/2日周期成分楕円が1日周期成分楕円よりも大きい時は1/2日周期成分楕円に「1/2」を, また, 楕円が大きい局についてはスケールを縮小して描いたので, 「×1.7」, 「×3.3」を記入して区別し, そして, 楕円が重なる局については中心位置を少しずらせて描き矢印で中心位置の移動を示した。地上エリア別水平発散量, 高度別水平発散量についてはそれぞれの水平発散量が連続して変化するものとして, -4, 0, +4(×10⁻⁴sec⁻¹)のコンターを描いた。次に, O₃値とOx値については過去の比較調査等からおおよそ一致している結果が得られているので, O₃値とOx値とは等しいとした。

考 察

1. 調査日の概要

大気汚染と関係の深い気象の観測結果と大気汚染物質濃度の測定結果について概要を述べる。

表3 Ox高濃度出現の気象条件

	地 上 天気図型	天気模様	地上気圧 傾度力	地上気温 日射量
5月27日	○	○	○	○
5月28日	×	×	×	×
7月21日	○	○	○	○
7月22日	○	×	○	○
8月5日	×	○	×	○
8月6日	×	○	○	○
9月1日	×	○	○	○
9月2日	×	○	×	○

○: 高濃度になりやすい条件
×: " なりにくい条件

表4 海風・陸風交替の有無

	臨海部(坂出)		内陸部(飯山)	
	早朝	夜間	早朝	夜間
5月27日	○	○	○	○
5月28日	○	△	○	△
7月21日	△	△	○	○
7月22日	×	△	△	○
8月5日	×	○	○	○
8月6日	△	○	○	○
9月1日	○	○	○	○
9月2日	○	○	○	○

○: 交替の明瞭なもの, △: 交替の不明瞭なもの
×: 交替の無いもの

1) 天気概況

各調査日の天気概況については表6に示すとおりであるが, Oxと気象との関係は特に重要であるので, 全8

日について、いくつかの気象因子をOx高濃度出現の立場から調べた。

地上天気図型：8日間の天気図を日本気象協会分類による12ヶの天気図型³⁾にあてはめると、過去に香川県でOxが高濃度になりやすい型⁴⁾であった日は、5月27日の南高北低型(H₄)、7月21、22日の東高西低型(H₅)、の3日間で、他はOxの高濃度が全く出現しなかった日であった。

天気模様：降雨があった日は5月28日の0.5mm(午前)と7月22日の8.5mm(午後)の2日間で、その他は晴、又は、晴のち曇であった。

地上気圧傾度力：中讃地域をおおむね4地点から求めた値であり、一般に値が10mb/1000km(理論値で風速約9.5m/sに相当)以上であればOxは高濃度にならないといわれているが⁵⁾、これを満たす日は5月28日、8月5日、9月2日の3日間であった。

地上気温、日射量：午前中に降雨のあった5月28日を除き、他は光化学反応によるNO₂→Oxの生成反応には十分であった。

以上、表3に示すとおり、Oxの高濃度が期待された日は5月27日と7月21日の2日間であった。

2) 大気拡散場

大気汚染物質は大気中で拡散・希釈されるが、拡散場には大別して水平方向と鉛直方向がある。水平方向は主に風により決定され、鉛直方向は逆転層、等温層等の混合層高度により決定される。

1) 水平方向の拡散場

まず、大気汚染物質の輸送に関与する早朝・夜間に熱的原因で発生する海風・陸風の交替の有無については、代表局として臨海部で坂出、内陸部で飯山を選びその有無を調べ表4に示した。日平均風速については臨海部で高度200mの四電、同地上で坂出、内陸部で飯山を選び、スカラー平均風速(各時間毎の風速の平均)とベクトル平均風速(各時間毎の風向風速をU、V成分に分離し、それぞれについて平均したのちベクトル合成した値で、風の1日の平均的な移動量を表す)を、また四電については昼間の主風向も求め図2に示した。上空風についても8日共パイボール観測を実施した飯山を選び10時と14時の高度100~500m(局地風である海風の上限高度は高くても500mまでで、その上層には一般風が吹走する2層構造を呈し、いわゆる海陸循環風はあまり形成さ

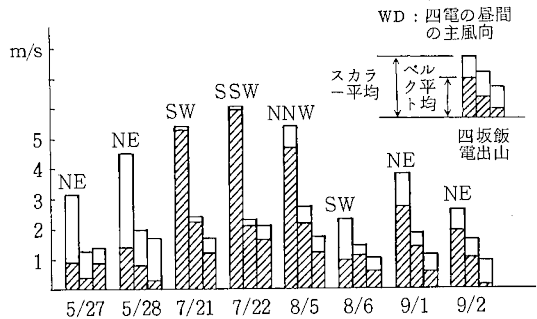


図2 日平均風速

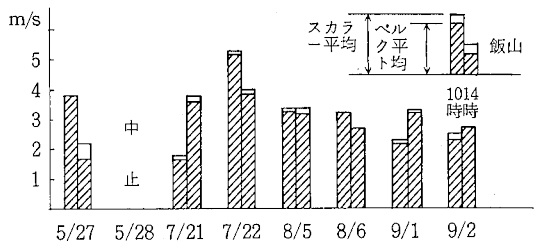


図3 上空風(高度100~500m)平均風速

れていなかった)について、スカラー平均値とベクトル平均値を求め比較し図3に示した。表4から、海陸風の発生が明瞭な日は5月27日、9月1、2日の3日間であったが、概して臨海部(坂出)よりも内陸部(飯山)で顕著であった。この理由として臨海部は海上で吹走する東西流の影響を受けるため、風向が海岸線と直角方向からずれることがあげられる。

次に、水平方向の拡散は平均風速が小さく、またスカラー平均とベクトル平均の差が大きいほど小さくなるが、図2によると5月27日、8月6日、9月1、2日の4日間が比較的拡散場が小さいと考えられた。臨海部と内陸部の日平均風速については、5月27日以外は内陸部の方が弱くなっている。四電の風向については、一般に海岸線に平行なNE又はSW方向の風向となることが知られているが、昼間の風向を調べるとNE系、SW系の他にN系も吹いていることがわかった。そこで、地形の影響を特に強く受けるといわれている接地境界層内の局地風でも、上空風の影響を強く受けることから、四電の昼間の風向を参考に8日間の上空の風系を次のとおり3分類した。

NE系：5月27、28日、9月1、2日の4日間

SW系：7月21、22日、8月6日の3日間

N系：8月5日の1日のみ

一方、風速についても四電のスカラー日平均風速を参考に弱風日(5.0m/s以下)と強風日(5.1m/s以上)とに分類した。

弱風日：5月27、28日、8月6日、9月1、2日の5

日間

強風日：7月21, 22日, 8月5日の3日間

なお、これらの分類はパイボール観測による結果ともほぼ一致し、以降の解析時の分類にも用いた。NE系の4日間についてはスカラー平均とベクトル平均の差が大きく、これは風向の日変化が大きいかを表している。SW系の3日間については8月6日を除き風強く、日変化も小さいことから卓越的な風であったと思われる。

次に、図3によるとと高度500mまでの風向については、5月27日の14時以外はほとんど変化がなく、この層内の風は海風、一般風のいずれにせよ、2~4m/sの卓越的な風であった。

ロ) 鉛直方向の拡散場

低層ゾンデ結果から得られた大気安定度等については表5に、また四電200mhの早朝(午前1~6時)の平均気温と坂上の地上同平均気温との差から求めた気温減率については図4に示した。表5によると、午前中の混合層高度の低い日は5月27日, 7月21, 22日の3日間であったが、8月5日, 9月1日については気温の変異点は観測されず一定の減率で低くなっていた。また、高度0~1,000mまでの平均気温減率をみると5月27日と9月1日が小さく、大気は安定していたように思われたが、未観測の日もあり統一的な評価はできなかった。

次に、図4によると、この期間の下層の気温減率は小さく、特に5月27, 28日, 8月6日, 9月1, 2日には逆転現象が現れ、大気の強安定、すなわち鉛直方向の拡散が強く押えられていたことがわかる。

以上の結果から、早朝の大気拡散場については5月27日が最も小さかったように思われる。

3) 大気汚染物質濃度

NO, NO₂の日平均濃度, O_xの日最高濃度についてそれぞれ比較し、図5, 6に示した。NO, NO₂が比較的高くなった日は5月27, 28日、次に7月21, 22日が続き他の4日間については低濃度であり、また、日平均濃度の最高値と最低値との差についても同様な出現傾向を示した。次に、期間中、日平均濃度が最高値を示した局は与島と丸亀で、そのすべてを占めた。5月27日はNO, NO₂共与島で最高値を示し、海上部でのNO_xの蓄積が考えられた。

O_xの日最高濃度が環境基準を越えた日は5月27日(108ppb), 7月21日(75ppb), 9月1日(62ppb)の3日間で、この日は日最高濃度の最高値と最低値との差が50ppb以上と大きかった日でもあり、O_x濃度に地域差がみられた。また、日最高濃度が最高値を示した局はすべて内陸部の局に限られ、最低値を示した局は一般にNO, NO₂が高い臨海部の局であった。

その他、NO₂ → O_xの反応に寄与する非メタン炭化

表5 低層ゾンデによる上空の大気安定度

	地上~1,000mまでの平均気温減率		混合層高度	
	AM	PM	AM	PM
5月27日	0.46 °C/100m		500m	
5月28日				
7月21日	0.86	0.84	400	700
7月22日	0.96	1.14	300	800
8月5日	0.94	1.05	—	—
8月6日	1.05	0.95	1,100	800
9月1日		0.58	—	—
9月2日				

註 1. AM: 10~11時, PM: 14~15時観測
2. 混合層高度は、逆転、又は等温に近い高度のうち下層のもの。

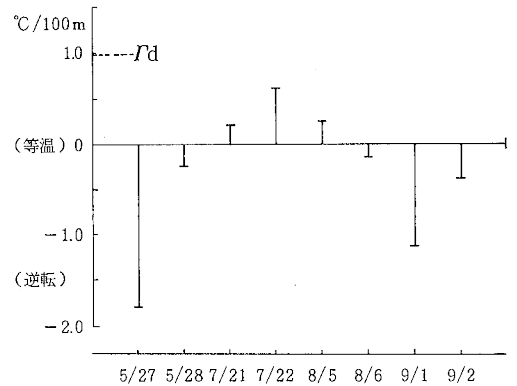


図4 早朝の下層の大気安定度

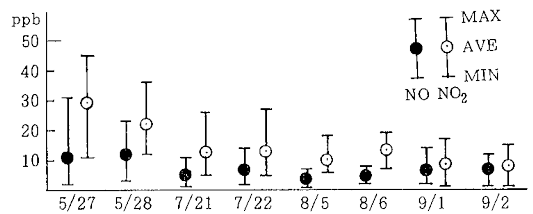


図5 NO, NO₂日平均濃度

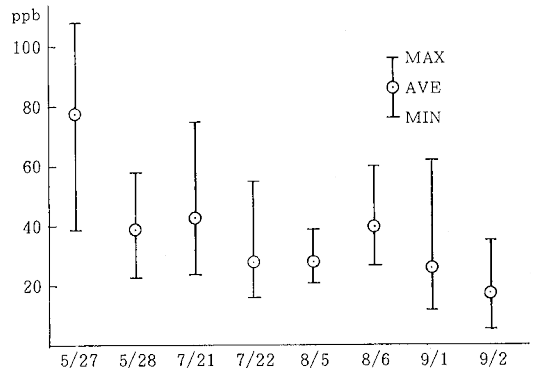


図6 O_x日最高濃度

水素 (NMHC) 濃度については、8日間共、坂出、丸亀、多度津の局でOxの生成防止のための指針値である午前6～9時の平均値0.2～0.31ppmcを越えており、値は0.58～0.68ppmcであった。

2. 調査日の事例解析

5月27日：Oxmax, 108ppb(13時), 飯山

パイボール観測結果によると、上空には4～5m/sのE風が吹走していた。このため昼間の海風の背は200m程度と低く風向もE成分を含み、海風の反流的な流れもほとんどみられなかった。14～16時にかけて下層(高度～500m)の風系はやや乱れが生じ弱風となったが、17時頃からは4～5m/sのS風が卓越した。

早朝、中讃地域はカーム、又はSEの陸風が吹き、陸地部の汚染質の海上部への輸送、船舶からの汚染質の排出、さらに低い混合層高度の効果も作用してNOx濃度は臨海部、島しょ部で高濃度(通常の2～3倍)になり、特に与島では午前3時にNO濃度106ppb、NO₂濃度65ppbを示した。陸風から海風への交替は臨海部で8時、内陸部で9時で、海風前線が内陸部へ1時間ほどで移動したと考えられ、このことはNO₂のピークのタイムラグが1時間であったことから確認できる。10時頃から、内陸部にはE風の一般流が侵入したが、内陸部のうち平坦な地形に位置する善通寺ではNの海風とEの一般流とが混合した風場が形成された。そしてこの頃から、Oxは全局で急速に上昇し13～16時にかけて高濃度のピークが続いた。この時間帯の風系は、臨海部ではNNEの海風が、内陸部ではEの一般流が吹く風場が形成され、同地域は南北に2分され、Ox濃度については海風域の臨海部では低く(最高74ppb)、一般流の支配する内陸部では高濃度(最高108ppb)になった。図7にOx高濃度時の地上流跡図とOx濃度を示す。

内陸部の高濃度OxはE風により運ばれてきたものと思われるが、山越え気流であるため輸送過程でのOxの生成よりも、上下混合により混合層内の高濃度Oxが下降したためと思われる。19時には地上の海風は消失し、同地域は弱風域と3～4m/sのS風が吹走する域とに2分され24時まで続いた。S風が吹走しやすいく多度津、郡家、善通寺でのOx濃度は40ppbとなったが、S風が吹かない弱風域の局では10ppb前後の低濃度であった。この時間帯のNOxの動向はOxとは逆であった。夜間、Ox濃度が40ppbにもなった原因はS風が上空の高濃度のOxを地上へ降下させたためと思われる。この下降成分の存在については、地上のエリアAの水平発散量が収束から発散へ大きく変化していることから推察される。

次に、Oxが高濃度になった13～16時のエリアBの高度別水平発散量を調べると、高度200mまでは収束域、

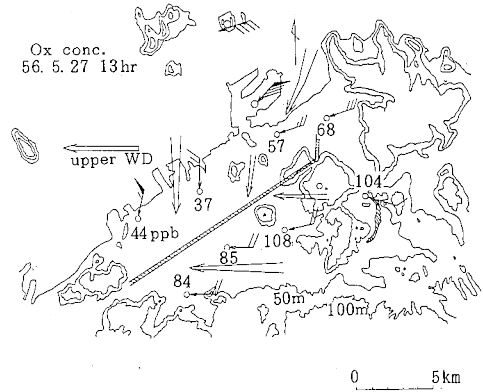


図7 Ox濃度と地上流跡図

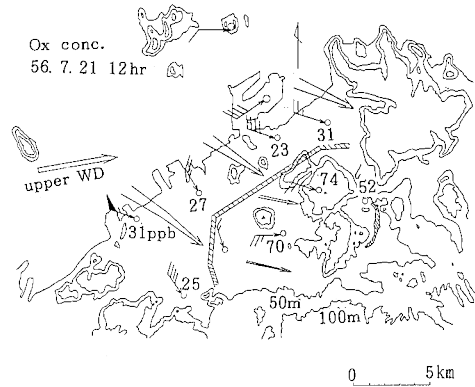


図8 Ox濃度と地上流跡図

700mまでは発散域、その上層には収束域が形成され、3層構造を呈しており、下層の収束高度200mはパイボール観測による海風の上層高度とも一致していた。17時からは下層の収束域は大きく発達し高度1,100mまでもなった。これは熱的な原因による収束に替わり、地形的效果による収束だと思われOx高濃度も17時以降下り始めた。

以上、5月27日の中讃地域は、昼間、Oxの高濃度域と低濃度域とが南北(臨海部と内陸部)に2分され、風場も異質であった。一方、夜間にはS風が吹きやすい局とそうでない局とが2分されたが、これは同地域を東西に2分するものであった。この様に、上空風の変化により、地上の風場も大きく変化し、Oxの動向もそれらと深く関係していることが確認できた。

5月28日：Oxmax, 58ppb(5時), 飯山

9時頃に細雨があり、上空気象観測は9時で中止した。前日の19時頃から吹いていたS風は8時頃までで、その

後9時から19時頃まではN～NEの海風が吹いた。しかし内陸部では風速が1～2 m/sと弱く風向も変動しており、海風はあまり発達しなかったと思われる。

前夜からS風が吹走してOx濃度が40ppbであった局は、9時の降雨、風の交替で濃度が一時的に下がったものの、15時頃まで30～40ppbを持続した。

一方、NOxの日変化は前日同様2山構造を示し、Oxの濃度分布についても前日同様、南北に2分されるパターンとなったが、全般的に低濃度であった。これは与島でのNOxの低濃度、午前中の降雨、日射量の不足、気温の低下等に起因するものと思われる。また、地上エリア別水平発散量によると、昼間に収束と発散が混在していたことも、Oxの高濃度化が抑えられた要因の1つであろう。20時から地上に2～5 m/sのSW風が吹走し、NOx濃度は低くなったがOx濃度は全局で少し上昇し、移流によるものと思われた。

7月21日：Oxmax, 75ppb(12時), 城山

パイボール観測結果から、上空には終日3～8 m/sのWSWの一般風が吹走し、下層では一般風の影響を受けた海風が14時頃まで吹いた。海風の背は臨海部の坂出で100 m、内陸部の飯山、府中で300～400 mとやや高く、風速は内陸部の方が1～2 m/s弱くなっていた。海風の反流については認められず上空は2層構造を呈していた。

次に、早朝の臨海部での陸風は不明瞭で風速もやや強く、このため、与島でのNOx濃度は40～50ppbと平日よりも少し高い程度で、5月27日のような蓄積はなかった。このことは、風の交替時にNOxの吹きもどしによるピークが現れていないことから推察できる。

陸風から海風への交替は臨海部で10時、内陸部で11時であったが、NOxの臨海部から内陸部への移流については濃度が低いこと確認できなかった。

11時から14時までは全域にNW～NNWの海風が侵入したが、臨海部と内陸部のうち地形の平坦な善通寺では4～5 m/sの風が吹き、その他の内陸部では1～2 m/sの弱風となった。Ox日最高濃度はこの時間帯に出現したが長続きせずピーク状であった。これは早朝、海上部でのNOxの蓄積が少なかったためと思われる。図8にOx高濃度時の地上流跡図とOx濃度を示すが、高濃度域と低濃度域に2分されているのがわかる。またこれは、海風の風速の強弱の区分とも一致している。内陸部のうち、善通寺の低濃度については臨海部からの海風が30分で到達するためにOxの生成反応が十分できないためと思われ、一方、飯山、府中については風速が弱いところから輸送過程でのOxの生成と、山の風下に位置するため上下混合による混合層からのOxの下降とが考えられる。次に、飯山、府中での風速が善通寺よりも½程度弱かった理由としては、地形のラフネスの差の他に、いわ

ゆる都市域のヒートアイランド効果⁸⁾による海風の衰退化現象の寄与があるものと思われるが、今後の課題であろう。

高度400 mの城山について、10時に風の交替が認められたが、NOx濃度は低濃度で終日一定であった。Ox濃度は早朝に40ppb、昼の最高濃度時には75ppbを示し、全局中で最も高かった。その後、14時に風はNEからWSW(2～3 m/s)に替わり24時まで続いたが、Ox濃度はその間、約50ppbであったので、この日の混合層高度が午後700 mであることを考え合わせると、混合層内上部でのOx濃度のベースは高く、夜間あるいは早朝まで消滅しないものと考えられる⁹⁾。

次に、Oxの早朝の濃度と日最高濃度との差については、城山で約30ppb、飯山で約60ppb、府中で約50ppbであった。このことは、NO₂の光化学反応によるOxの生成の寄与率が高度400 mの城山では他局と較べ小さいことを裏付けるものと考えられる。

地上では15時から20時までWSWの風が卓越しOx濃度は下り始めた。21時には風は弱くなり陸風が発生したがNOx濃度はあまり変化しなかった。

以上、7月21日は中讃地域全域でNW系の海風が侵入したが、地形的に風速の強い地域と弱い地域とに2分され、Ox濃度も同様な傾向を示し、内陸部のうち平坦な地形に位置する善通寺のOxは臨海部と同様な振舞いをした。

7月22日：Oxmax, 55ppb(20時), 城山

前日から吹走していたWSW方向の一般風はさらに勢力を強め、風の鉛直分布はエクマンスパイラルに似た構造を呈した。このため地上でも早朝に風の交替はみられず、17時頃まで3～5 m/sのWSW風が卓越した。また、夕方には降雨もみられ天候にはめぐまれていなかった。

NOx濃度は与島、丸亀を除き低濃度で、Ox濃度についてもあまり上昇せず日最高濃度出現時刻も19～20時と遅かった。しかし、Ox高濃度時の濃度分布は低濃度ながら7月21日と類似していた。

8月5日：Oxmax, 39ppb(14時), 飯山

上空では終日、4～10 m/sのNW～N風が卓越し、気温の鉛直分布についても強不安定であった。

臨海部では早朝からNWが吹いていたが、内陸部では8時に陸風からNW風に替わり、中讃地域の風場は均一となり、2～4 m/sのNW～N風が21時まで続いた。その後、風速は弱まり、全域で陸風が発生した。

NOxは低濃度で日変化もあまりみられず、Oxについても、日変化はなだらかな1山構造となり、日最高濃度の差も18ppbと調査期間中で最小を示し、地域差はあまりみられなかった。

一方、城山では終日3～6 m/sのNW～N風が卓越し、

Ox 濃度も 30ppb 前後と一定で、水平・鉛直方向の拡散場は大きかった。また、高度別水平発散量が 14~17 時に発散場となっていることも低濃度の一要因であろう。

8 月 6 日：Oxmax, 60ppb (18, 19 時), 城山

パイボール観測によると、前日からの N 風は風向をやや W 方向に変えて吹いたが、夜間観測を実施した府中では前日の 21 時から当日の 5 時にかけて、高度 100 m ~ 200 m で陸風と思える弱風がみられた。

地上風は 8 時頃まで 1 m/s の SE 方向の陸風が吹いていたが、9 時には 2 ~ 3 m/s の WNW の海風に替わり 18 時まで吹き、その後は陸風が発生した。一方、城山でも前日と異なり、16 時頃までは 1 ~ 2 m/s の NW 方向の風が吹いていたが、18 時からは S 方向の弱風に替わった。このように、8 月 6 日は前日と異なり、地上では朝夕に海陸風の交替がみられ下層の大気も安定していたこともあり Ox 日最高濃度は前日の 39ppb に比べ 60ppb にもなった。

Ox 日最高濃度が 50ppb 以上になった局は、林田、飯山、城山の 3 局で、このうち林田と飯山は 13 ~ 18 時にかけて高くなったが、城山については 14 ~ 24 時まで 60ppb が持続した。城山以外の局では海風の侵入と同時に Ox 濃度は上昇を始め、海風が陸風に交替する 18 時から濃度は下る 1 山構造であったが、城山については早朝のベースも 20ppb とやや高く、夕方の風の交替以後も Ox 濃度は変化せず 60ppb の一定値であった。このことは、午後の混合層高度が 800 m であることから、少なくとも高度 400 m の上空では、高濃度の Ox が幅広く存在していたことが推測され、昼間、光化学反応により生成した Ox は上空で夜遅くまで残ることが考えられた。

次に、高度別の水平発散量では、9 時から観測終了の 14 時にかけて、下層の発散域が上空へ発達していること、地上のエリア別水平発散量でも、エリア C はほとんど発散域で日変化がないこと等から、Ox の日最高濃度が 60ppb 止まりで、思ったより上昇しなかったものと思われる。

9 月 1 日：Oxmax, 62ppb (15 時), 郡家

台風 18 号は上海沖をゆっくり北上している。パイボール観測によると下層では E 風、上層では S 風が吹いた。低層ゾンデから求めた気温減率は 0.58°C/100 m で、安定であるといえるが、これは台風により上風に暖気が流入しているためと思われる。

地上風は朝夕に海陸風の交替がみられたが、昼間の海風は臨海部で NE、内陸部では最初、NE であったが 15 時からは E に替わり、5 月 27 日と同様な風場となった。

NOx の日平均値については臨海部で 14 ~ 31ppb、内陸部では 3 ~ 7ppb とかなりの差があり、特に郡家では終日、1 ~ 2ppb の低濃度であった。

Ox 日最高濃度は郡家で 62ppb、その次は府中の 36

ppb と続くが、臨海部ではすべて 20ppb 以下であり濃度分布は南北に 2 分された。次に、郡家の Ox 濃度が他局と較べ特に高濃度になったが、この理由として、E 風の時に高く NE 風の時に低くなることから、風上の地形のラフネスの差による気流の上下混合による高濃度 Ox のピンポイント的な下降⁶⁾によるものと思われるが、風上に位置する飯山での Ox、NOx データの欠測等で推測の域を出ない。

9 月 2 日：Oxmax, 35ppb (14 時), 府中

台風 18 号の北上により上空では E ~ S 風が吹走し、地上風は、上空の S 系の風の影響を受け、海風の発達は遅く 11 時であった。

臨海部の Ox 濃度は低く、最高でも 13ppb で、一般に NOx 濃度よりも低かった。一方、内陸部の NOx 濃度は低く日変化もみられない。郡家の Ox 日最高濃度は 31ppb で、前日の 62ppb と較べ 1/2 と低かったが、これについては郡家の風向は S ~ W であり、前日の E 風とは大きく異なることがあげられる。

NOx、Ox 濃度は低濃度であったが、濃度分布は前日と同様であった。

3. 風の地域特性

各局の地理条件はすべて異なるが、地形は一般に臨海部よりも内陸部の方が複雑である。内陸部のうちでも善通寺は平坦な地形に位置しているが、飯山、府中は山の南側、あるいは山間にあり、風向によってはかなりの山の影響を受けることが予想される。

今回は、地上風については調和解析、上空風についてはパイボール観測結果を用いて各地域の風の特徴を調べた。

1) 地上風

調和解析により得られる結果のうち、ベクトル平均値の大きさと方向からは海陸風に作用する山谷風・一般風の影響が、1 日周期成分楕円の大きさからは海風の勢力が、同楕円の回転方向、偏平率、長軸方向からはコリオリの力と地形の相互作用が、1/2 日周期成分楕円からは海陸風の周期特性を知ることができる。

全 8 日のベクトル平均値の方向を調べると、おおよそ NE, SW, N の 3 風系に分割でき、これは 1 の 2) のイ) で四電の昼間の風向により分類した風系とも一致した。

以下、風系別に特徴を述べる。

NE 系 (5 月 27, 28 日, 9 月 1, 2 日)

1 日周期成分楕円の回転方向はほとんどの局で反時計回りで、コリオリの理論¹⁰⁾に反するが、これは地形の影響によるものと思われる¹¹⁾。ベクトル平均値の大きさについては臨海部では大きい、内陸部では小さく、臨海部の方が一般風の影響を受けやすいことを表している。

同方向については臨海部でN成分、内陸部でS成分であるので両地域で吹く風はやや異質であることをうかがわせている。次に、内陸部のうちでも山間に位置する府中では1日周期成分楕円の偏平率は大きく(細長い)、1/2日周期成分楕円が小さいことから、風の交替が顕著であることがわかり、ここでの風は地形的に収束しやすいと考えられる。1/2日周期成分楕円が大きい局は林田と飯山であるが、この2局に共通している点は風上に山があることで、山の影響により比較的短時間で風向が変動するものと思われる¹²⁾。

その他、5月27日の夜間の例のように、上空がS風の時、地上でS風が吹走しやすい局とそうでない局とが明確に分割されるなど、地形と上空風との相互作用は複雑である。

SW系(7月21, 22日, 8月6日)

1日周期成分楕円の回転方向については、7月21日は反時計回りであるが、7月22日では逆に時計回りとなっており、一般に上空風が強くなればコリオリの理論に従うようである。ベクトル平均値の大きさについては、NE系の時に比べて大きく、方向もほぼWであることから、各局ではW方向からの風の寄与を大きく受けていると思われる。また、1日周期成分楕円の偏平率は大きく、1/2日周期成分楕円は小さいことから、海陸風の交替についてもNE系の時に比べ顕著であると思われる。その他、風速については、臨海部で強く内陸部で弱いこともわかるが、概してNE系の時のような地域差はみられなかった。

N系(8月5日)

1日周期成分楕円の回転方向は時計回りで、この日も風速は強かった。ベクトル平均値の大きさはSW系の時と同様に大きく、同方向はほぼ海岸に直角で上空風の影響を大きく受けている。次に、1日周期成分楕円は大きく、同偏平率は府中を除き小さいところから、地上風向は時間と共に時計回りに回転しやすいことを表している。結局、地上風はN系の場合もSW系の時と同様に、上空風の勢力を大きく受けるが、異なる点は時間変化による風向の回転がみられることである。

2) 上空風

パイボールによる3点同時観測を実施した結果、地形の影響により風が大きく異なる最大高度は600mまでで、それ以上になると3地点ともよく似ていた。中讃地域で高い山は城山の462m、飯山の422mであるので、それよりも100~200m上空まで影響を受けるものと思われる。

次に、各観測地点が山の風上、風下のどちらに位置するかによっても、その影響の度合は大きく異なるので、統一的なことはいえないが、一般風の勢力が強い7月21

日の午後、7月22日、8月5日については各地点ともあまり差はなかった。一方、勢力が弱まると、内陸部のうち飯山と府中では風速は弱くなり、風向も飯山、城山等の山を迂回するように1~2方位変化するようである。

4. 水平発散量の地域特性

1) 地上エリア別水平発散量

地形的に特徴のあるA, B, C, D, Eの5エリアの水平発散量をベラミー法により求め、各エリア毎に比較することにより地域特性を調べた。なお、地上風から求めたので、発散(+)は下降流、収束(-)は上昇流に相当する。

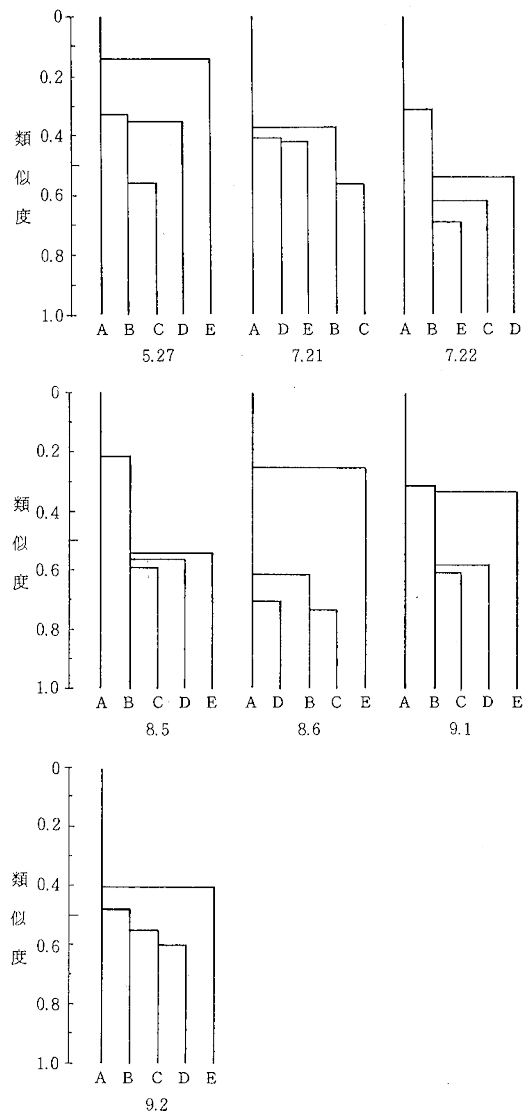


図9 水平発散量のデンドログラム

各エリアの収束・発散量は日により大きく異なるため詳細な検討はできないが、各エリアの日変化は発散→収束→発散の周期で変化し、エリアA, Eは収束、エリアB, C, Dは発散となりやすい。次に、平坦な地形のエリアBと城山を囲むエリアDとの比較については、日変化はよく似ているが、どちらかといえば昼間はエリアDの方がやや収束気味で、地形による違いが表れているものと思われる¹³⁾。

次に、統計的手法のクラスター分析¹⁴⁾を用い、調査日毎に水平発散量の地域特性を調べた。資料は、降雨のため観測を午前で中止した5月28日を除く7日間の1時間毎の水平発散量を用い、個体間距離はユークリッド距離の平方とし、クラスター間距離の算出には最短距離法を用いた。

調査日毎の結果は図9に示す。

NE系の3日についてはエリアが、A, BCD, Eと3分割になった。この日は四電の平均風速は5 m/s以下で、地上では朝夕に海陸風の交替がみられた日であった。次に、7月22日と8月5日については、AとBCDEとに分かれ、この日は同風速は5.1 m/s以上で臨海部では朝に陸風から海風への交替はなかった。7月21日と8月6日については、風系はSWであったが、同平均風速に差がみられたため、それぞれADEとBC, ABCDとEに分かれた。

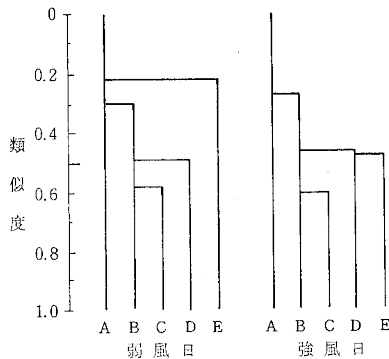


図10 水平発散量のデンドログラム

次に、四電の平均風速5.0 m/sを境にして、風の弱い日(5月27日, 8月6日, 9月1, 2日)と強い日(7月21, 22日, 8月5日)に分けてクラスター分析すると図10に示すとおりであった。

以上のことから、一般風が弱く日中晴れて海陸風が発達する日のエリアは、A, BCD, Eと分かれ、一般風が強くと海陸風が発達しにくい日のエリアはAとBCDEに分かれるパターンが一般的であり、風系よりも風速に支配される結果が得られた。

2) 高度別水平発散量

パイボールによる3点同時観測から求めるが、エリアBは5, 9月, Dは7, 8月と月を分けて調査したのと、日により上空の風向風速がかなり異なったことから両エリアの比較はできなかった。

次に、上空の収束・発散についても、1)の地上エリア別水平発散量と同様、風系よりも風速により違いが生じており、上空風速が弱い日は地上から上空へ、収束・発散・収束域が形成される3層構造となりやすいが、上空風速が強い日は一般に収束よりも発散となるようである。

5. 大気汚染物質の地域特性

NO, NO₂は日平均濃度を、O_xは日最高濃度を用い調べた。各調査日の事例解析結果を参考にすると風系別に解析をするのが適当と思われたので、風系別にクラスター分析をした。一例としてO_xのクラスター分析結果を図11に示す。

NO, NO₂については風系によらずほとんど同様な分割を示し、濃度分析についても丸亀, 坂出, その他の局の順で濃度は低下し、クラスター分析による分割結果とほぼ一致した。

O_xについては風系別の特徴がよく表現され、また、風系別の、クラスター分析による分割地域と濃度分布とは一致し、O_x濃度分布は上空風向に大きく左右されることが確認された。なお、N系については8月5日の1日のみで、濃度も低かったので参考程度になろう。これらの分割図については欠測等でクラスター分析できなかった与島等の局も加え図12に示す。

次に、地上風についてもスカラー平均とベクトル平均を風系別にそれぞれクラスター分析したが、スカラー平均については風系によらず多度津のみが大きく分離され風速も強かった。ベクトル平均についてはどの局もよく似た値で分離できなかった。NO_x, O_xの分割地域と地上風の日平均風速との関係については、クラスター分析では認められなかった。

ま と め

56年度は内陸部におけるNO_x, O_x等の濃度分布の地域特性を把握し、分類することを主な目的として調査を実施した。調査結果をまとめると次のとおりである。

1) 瀬戸内海は地形の関係上、中四国に平行に吹走する風が発生しやすく、地上風の他、O_xもその影響を大きく受けることが確認され、今回の調査では上空風の風系を、NE系, SW系, N系の3風系に分類することが適当と思える結果が得られた。

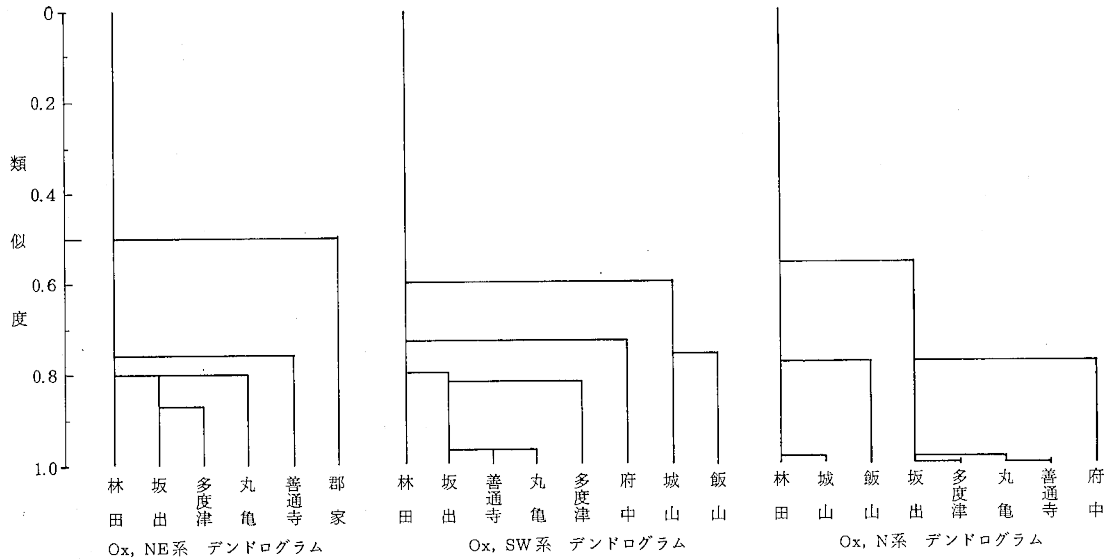


図11 O_xの風系別デンドログラム

2) O_x高濃度時の濃度分布特性は上空風の風系により決定され、NE系の時の濃度分布は低濃度域(臨海部)と高濃度域(内陸部)とが南北に分けられ、この時の地上風も臨海部では海風、内陸部ではE風と異なった風場が形成され、内陸部の高濃度O_xは移流過程での上下混合による寄与が大きいものと推察された。SW系の時は、内陸部のうち地形が平坦で海風が衰えないまま侵入してくる普通寺は臨海部と同様に低濃度であったが、他の内陸部では高濃度になる濃度分布を示した。この時は全域に海風が侵入したが、O_xが高濃度になった局では海風は衰え、大気は停滞気味となったため、主に輸送過程でのO_xの生成が寄与したものと考えられた。

次に、N系の時も濃度に地域差がみられたが、全般的に低濃度で、事例日も1日のみであったため分布図はやや正確さに欠けると思われる。

また、これらの風系別の濃度分布は、クラスター分析による地域分割結果とも一致し、風系別の濃度分布図の有意性が確認できた。

3) NO, NO₂の日平均値については一般に臨海部で高く、内陸部で低いパターンとなり、これは上空風の風向風速に左右されず一定で、近くの発生源からの寄与が大きいと考えられた。

早朝、弱風の陸風が発生し、大気も安定であればNO_xは海上部で蓄積されやすく、海風の発生後1時間程で内陸部へ輸送される結果も得られた。また、早朝のNO_xの蓄積と昼間のO_x濃度とは関係があり、蓄積量が多いとO_xは高濃度になりやすく長時間持続するようである。

4) 高度400mの城山でのNO_x濃度は低く日変化もほ

んどみられないが、O_x濃度については早朝のベースは高く、昼間の高濃度出現後も風系の変化に関係なく夜遅くまで大気安定層内で幅広く存在し、早朝まで消滅しないことが確認された。

夜間、S風が吹走する時に地上では地形的にS風が吹きやすい局と、そうでない局とが東西に2分され、前者の局ではO_x濃度は40ppbと高くなったが、後者の局では10ppb前後の低濃度となり、S風により上空の高濃度O_xが下降してきたと思われる結果が得られた。

5) 調和解析結果によると、地上風の日変化は地形、上空風に影響されるが、山間に位置する府中では効果が大きく、風は地形的に収束されやすくなる。

地上の水平発散量の日変化は、海陸風が発達する日には、発散→収束→発散となりやすく、O_xの高濃度は収束域で発生することが確認され、山を囲むエリアの水平発散量は平坦部のエリアと比べ昼間、やや収束となりやすく、上昇流が発生しやすくなることもわかった。

高度別の水平発散量についても、昼間、下層から収束→発散→収束の3層構造となりやすく、海風域の上層には一般流と性質の異なる中間層の存在が確認された。しかし、この中間層は熱的原因で発生する海風の帰還流の存在を必ずしも証明するものではないと思われるが、水平発散量を算出することにより、上空風の性質を区分することができ、解析時に有用である。また、下層で収束域が形成される高度は海風の上限高度とほぼ一致することも確認され、上空の収束・発散がO_xの高濃度出現に関与すると思われる結果が得られた。

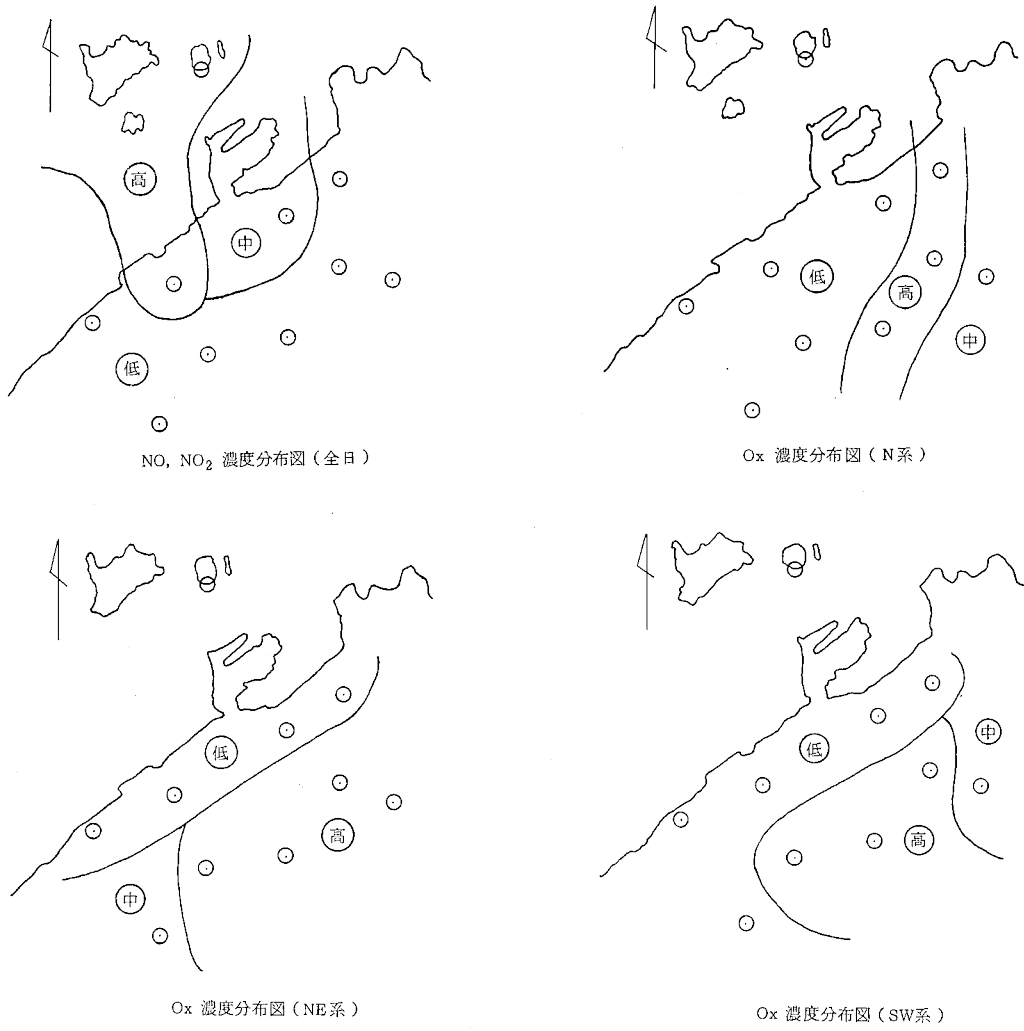


図12 風系別濃度分布図

終わりに、本調査研究にあたり御協力いただいた坂出市公害交通課、丸亀市公害交通課、善通寺市企画課、飯山町住民課、飯山高等学校、城山カントリークラブの方々に深く感謝します。

文 献

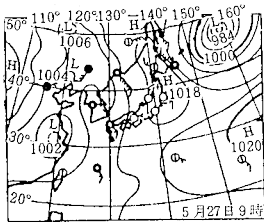
- 1) Bellamy: Objective calculation of divergence vertical velocity and vorticity Bull. Amer. Soc., 30,, 40 (1949)
- 2) 藤岡博文, 三好健治, 山本 務, 中林正一, 森下玲子, 納田徹也, 美澤 颯: 中讃地域内陸部における海陸風循環特性と光化学オキシダントについて(第一報), 香川県公害研究センター所報, 5,, 64 (1980)
- 3) 環境庁: 光化学オキシダント広域解析調査(瀬戸内地域), p3 (1978)
- 4) 中林正一, 藤岡博文, 串田光祥, 三好健治, 山本務, 日野康良, 岩崎ふみ代: 光化学オキシダント汚染について, 香川県公害研究センター所報, 2,, 75 (1977)
- 5) 中林正一, 三好健治, 山本 務, 藤岡博文, 串田光祥, 納田徹也, 美澤 颯: 中讃地域の臨海部および島しょ部における光化学大気汚染について(第三報), 香川県公害研究センター所報, 4,, 102 (1979)
- 6) 若松伸司: オゾン濃度の平面分布と気流の観測, 天気, 22, 8, 60 (1975)
- 7) 数理計画: 環境庁委託業務結果報告書(光化学大気汚染予測システム設定調査, 瀬戸内地域), p 220 (1980)
- 8) 藤部文昭, 浅井富雄: 関東地方における局地風に関する研究, 天気, 26, 11, 41 (1979)
- 9) 鶴田治雄: 沿岸地域での光化学オキシダント濃度の

- 垂直分布の日変化(1), 日本気象学会1982年春季大会講演予稿集, 41,, 93 (1982)
- 10) 気象ハンドブック編集委員会: 気象ハンドブック, 朝倉書店, p343 (1979)
- 11) 楠田 信, Pinhas Alpert, 阿部信男: 海陸風ホドグラフの反時計廻りの回転について(その1), 日本気象学会1982年秋季大会講演予稿集, 42,, 105 (1982)

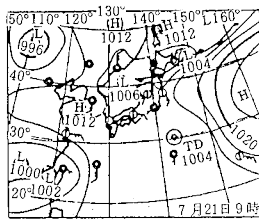
- 12) 宮田賢二: 内陸部における局地風の研究, 広島女子大学家政学部紀要, 12,, 45 (1977)
- 13) 楠田 信, 阿部信男: 大分市の海陸風, 天気, 29, 1, 85 (1982)
- 14) 河口至商: 多変量解析入門Ⅱ, 森北出版, p 26 (1978)

表6 気象条件一覽表

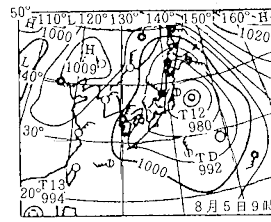
	地上天気図(9時)	地上天気図分類	天気模様(6~18時)	地上気圧(mb/1000km)	地上気圧傾度ベクトル		地上気温			日射量 MJ/日	降雨量 mm
					力	地風傾向	最高 °C	平均 °C	日較差 °C		
5月27日	図A	南高北低型(夏型) H 4	① → ◎	1010.8	3.9	WSW	28.6	21.4	14.4	16.9	-
5月28日	図B	本州付近の低気圧型 L 2	◎ // ●	1002.1	18.6	WSW	22.8	20.2	5.2	8.7	0.5 (9時)
7月21日	図C	東高西低型(夏型) H 5	①	1008.7	3.3	WNW	35.0	29.3	10.9	23.2	-
7月22日	図D	東高西低型(夏型) H 5	① → ◎	1007.4	2.5	N	34.1	28.7	8.7	18.7	8.5 (18,19時)
8月5日	図E	西高東低型 H 1	①	997.7	18.7	NE	29.3	24.5	10.1	23.7	-
8月6日	図F	西高東低型 H 1	①	1003.8	4.7	ENE	27.6	21.9	10.8	19.1	-
9月1日	図G	台風型 T	①	1014.0	6.7	WSW	31.6	27.0	10.3	19.8	-
9月2日	図H	台風型 T	① → ◎	1010.8	10.4	SW	32.2	27.3	9.9	14.3	-



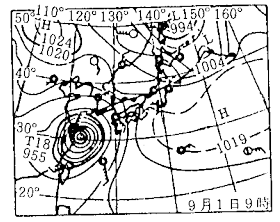
図A



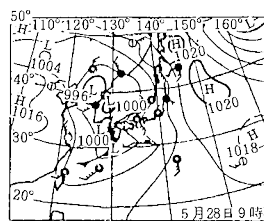
図C



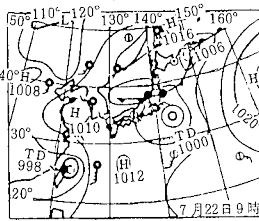
図E



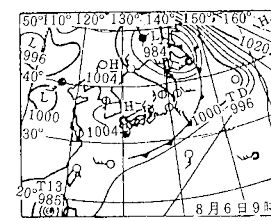
図G



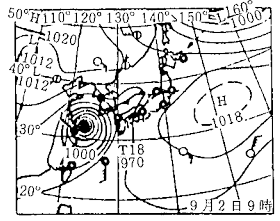
図B



図D



図F



図H